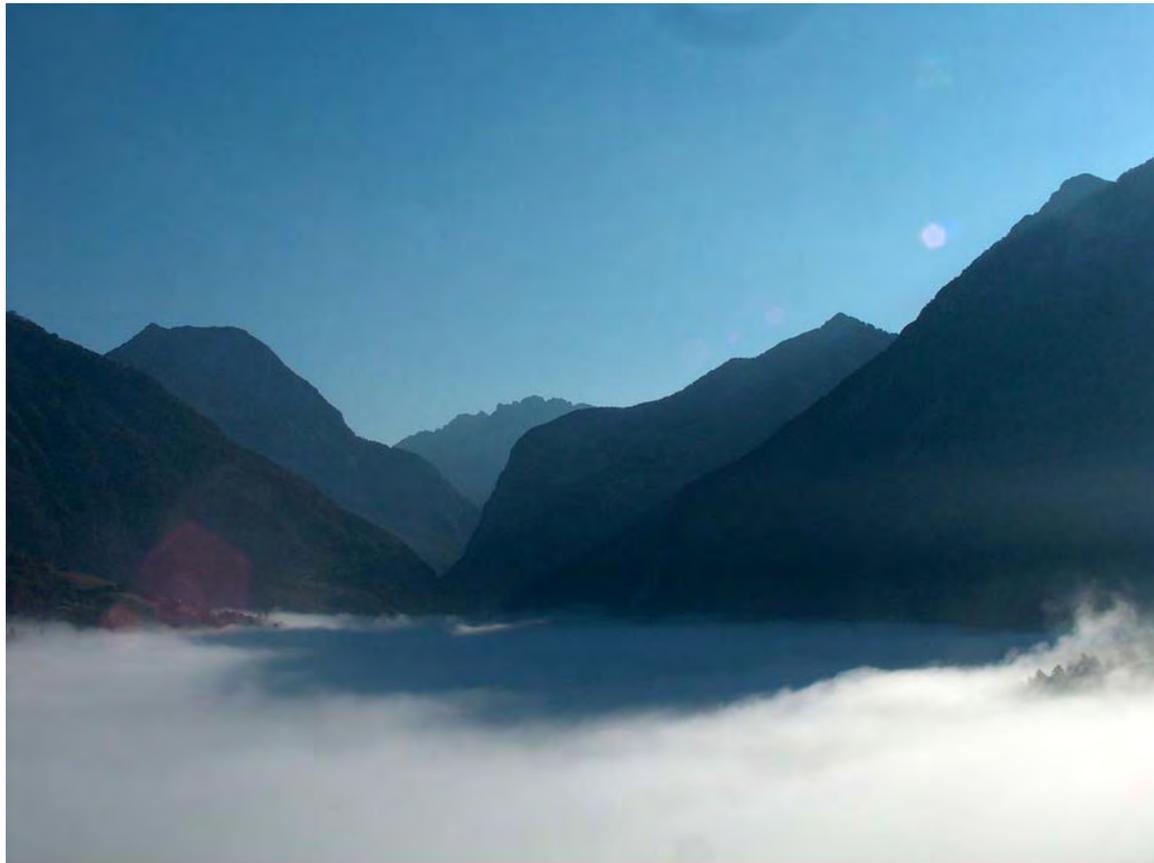


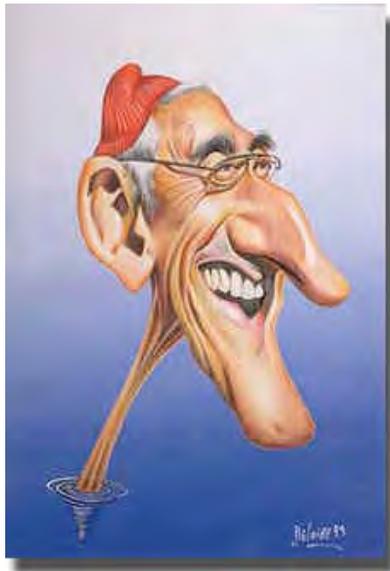
ETUDE DE LA LIMITE CRETACE-TERTIAIRE A ERTO

(PROVINCE DE PORDENONE, ITALIE DU NORD)



TRAVAIL DE DIPLOME EFFECTUE A L'INSTITUT DE GEOLOGIE ET D'HYDROGEOLOGIE DE
L'UNIVERSITE DE NEUCHATEL (SUISSE),
PAR **GAËL COMMENT**, SOUS LA DIRECTION DU **PR. ASS. THIERRY ADATTE**

Neuchâtel, juin 2006



« Le bonheur pour une abeille ou un dauphin est d'exister.
Pour l'homme, c'est de le savoir et de s'en émerveiller. »

Jacques-Yves Cousteau

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	1
---------------------	----------

REMERCIEMENTS	2
----------------------	----------

RESUME	3
---------------	----------

CHAPITRE 1	INTRODUCTION	4
-------------------	---------------------	----------

1.1	But et méthodes	4
1.2	La limite Crétacé – Tertiaire (KT)	4
1.2.1	<i>Introduction</i>	4
1.2.2	<i>Impact</i>	6
1.2.3	<i>Volcanisme</i>	7
1.2.4	<i>Fluctuations</i>	8
1.2.5	<i>Conjonction de causes</i>	8
1.2.6	<i>GSSP de la limite KT : Coupe d'El Kef, Tunisie</i>	9

CHAPITRE 2	SITUATION	11
-------------------	------------------	-----------

2.1	Situation géographique	11
2.2	Histoire géologique des Alpes	12
2.3	Evolution paléogéographique des Alpes méridionales	14

CHAPITRE 3	CARTOGRAPHIE	18
-------------------	---------------------	-----------

3.1	Localisation	18
3.2	Géomorphologie	18
3.3	Catastrophe de Vajont	19
3.3.1	<i>Le désastre</i>	19
3.3.2	<i>Déroulement</i>	19
3.4	Description des lithologies	20
3.5	Les systèmes d'information géographique (SIG)	24
3.5.1	<i>Relation entre les objets</i>	24

3.6	3.5.2 <i>Représentation des données spatiales</i>	24
	Cartes réalisées	25

CHAPITRE 4	COUPE DE LA SPESSE	26
-------------------	---------------------------	-----------

4.1	Levé de coupe	26
4.2	Description de la coupe	27

CHAPITRE 5	MICROFACIES	30
-------------------	--------------------	-----------

5.1	Méthode	30
5.2	Description	31
	5.2.1 <i>Classification</i>	31
	5.2.2 <i>Observations</i>	33
5.3	Discussion	39

CHAPITRE 6	BIOSTRATIGRAPHIE	40
-------------------	-------------------------	-----------

6.1	Méthode	40
6.2	Foraminifères planctoniques	40
	6.2.1 <i>Evolution des foraminifères planctoniques</i>	40
	6.2.2 <i>Paléobathymétrie</i>	41
	6.2.3 <i>Biozonation</i>	42
6.3	Lames minces	44
6.4	Discussions	50
6.5	Taux d'accumulation	51

CHAPITRE 7	MINÉRALOGIE	53
-------------------	--------------------	-----------

7.1	Méthode	53
	7.1.1 <i>Préparation de la roche totale</i>	54
	7.1.2 <i>Préparation des argiles</i>	54
7.2	Minéralogie de la roche totale	55
	7.2.1 <i>Résultats</i>	55
	7.2.2 <i>Rapport Calcite/Détrisme</i>	59
	7.2.3 <i>Interprétations</i>	59
7.3	Minéralogie des argiles	61
	7.3.1 <i>Les minéraux argileux</i>	61
	7.3.2 <i>Signification paléoenvironnementale des argiles</i>	63
	7.3.3 <i>Résultats de la fraction <2µm</i>	64

7.3.4	<i>Détermination de la nature des micas pour la fraction <2µm</i>	71
7.3.5	<i>Résultats de la fraction 2-16µm</i>	72
7.3.6	<i>Détermination de la nature des chlorites pour la fraction 2-16µm</i>	77
7.3.7	<i>Interprétations</i>	78

CHAPITRE 8	ANALYSES GEOCHIMIQUES	80
-------------------	------------------------------	-----------

8.1	Méthode	80
	8.1.1 <i>Minéralisation</i>	80
	8.1.1 <i>Fonctionnement de l'ICP-MS</i>	80
8.2	Introduction	82
8.3	Comportement des éléments	82
8.4	Résultats	84
8.5	Analyse statistique	94
8.6	Interprétations	99

CHAPITRE 9	MATIERE ORGANIQUE	101
-------------------	--------------------------	------------

9.1	Méthode	101
9.2	Résultats	102
	9.2.1 <i>Carbone organique total (TOC)</i>	102
	9.2.2 <i>Carbone minéral (MinC)</i>	102
9.3	Interprétations	104

CHAPITRE 10	ETUDE DU PHOSPHORE	105
--------------------	---------------------------	------------

10.1	Introduction	105
10.2	Méthode	106
10.3	Résultats	106
10.4	Interprétations	108

CONCLUSIONS	111
--------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE	114
----------------------	------------

ANNEXES

1 CARTOGRAPHIE I

1.1	Etapes du rapport SIG	I
1.1.1	<i>Création des dossiers</i>	I
1.1.2	<i>Géoréférenciation de la carte topographique</i>	II
1.1.3	<i>Numérisation des différents thèmes</i>	II
-	<i>Points</i>	II
-	<i>Lignes</i>	III
-	<i>Polygones</i>	III
1.1.4	<i>Insertion de l'azimut et du pendage</i>	V
1.1.5	<i>Création d'une « geodatabase »</i>	V
1.1.6	<i>Organigramme</i>	VII
1.2	Données GPS	VIII

2 METHODES XI

2.1	Biostratigraphie	XI
2.1.1	<i>Lavages</i>	XI
2.2	Minéralogie	XIII
2.2.1	<i>Broyage</i>	XIII
2.2.2	<i>Poudres désorientées</i>	XIII
2.2.3	<i>Minéralogie des argiles, préparations orientées</i>	XIV
-	<i>Décarbonatation</i>	XIV
-	<i>Lavage de l'acide</i>	XV
-	<i>Séparation des fractions <2 µm</i>	XV
-	<i>Séparation des fractions 2-16 µm</i>	XVI
2.3	Matière organique	XVII
2.3.1	<i>Rock-eval</i>	XVII
2.4	Analyses géochimiques à l'ICP-MS	XVIII
2.4.1	<i>Minéralisation</i>	XVIII
-	<i>Pesée</i>	XVIII
-	<i>Mise en solution</i>	XVIII
-	<i>Micro-onde</i>	XIX
-	<i>Filtration</i>	XIX
2.4.2	<i>Statistiques</i>	XX
2.5	Phosphore	XXII
2.5.1	<i>Préparation des échantillons</i>	XXII
2.5.2	<i>Mesure du phosphore</i>	XXIII

3	RESULTATS EXPERIMENTAUX	XXIV
3.1	Minéralogie	XXIV
3.2	Rock-eval	XXXIII
3.3	ICP-MS	XXXIV
	3.3.1 <i>Minéralisations</i>	XXXIV
	3.3.2 <i>Résultats</i>	XXXVII
	3.3.3 <i>Statistiques</i>	XXXIX
3.4	Phosphore	XL
	3.4.1 <i>Echantillons</i>	XL
	3.4.2 <i>Résultats</i>	XLI

AVANT-PROPOS

Lors du retour de ma deuxième campagne sur le terrain en septembre 2005, j'ai subi la douloureuse expérience de me faire forcer ma voiture sur une aire d'autoroute italienne. Mon ordinateur portable contenant toutes les données et les photos de ces jours de travail s'était volatilisé.

Le but de ces deux semaines à Erto était de réaliser la carte géologique de la région. Mes notes de terrains ainsi que mes diverses cartes étaient par chance encore en ma possession. Les descriptions des lithologies seront donc illustrées par les photos de la première session de terrain effectuée en septembre 2004 et non par celles plus précises, mais perdues, de 2005.

REMERCIEMENTS

...Au **Pr. ass. Thierry Adatte**, pour l'encadrement, les moyens mis à disposition, ainsi que la confiance accordée tout au long du travail.

...Au **Dr. Gerta Keller**, de l'Université de Princeton, NJ (USA), pour la détermination des foraminifères.

...A **Virginie Matera**, pour ses nombreuses explications et les analyses géochimiques.

...Au **Dr. Valeria Luciani**, de l'Université de Ferrara (Italie), pour les informations fournies dans le cadre de l'étude biostratigraphique.

...Au **Dr. Mahmoud Bouzelboudjen**, de l'Université de Neuchâtel, pour ses conseils avisés lors de l'élaboration du projet GIS.

...A **Stéphane, Alexis et Haydon** pour leurs conseils sédimentologiques et phosphoriques.

...A **Charles**, pour son aide structurale lors de la réalisation des cartes et coupes géologiques.

...A **Stéphane Cattin**, pour ses éclaircissements tectoniques au sujet des Dolomites.

...A **Tiffany, Pascal et Laurent**, pour leur aide lors des différentes manipulations en laboratoire et à **Raul** pour ses explications claires lors de l'analyse statistique.

...A **André Villard**, pour la préparation des lames minces et les discussions durant mes analyses.

...A **Manuel Da Silva**, pour sa bonne humeur et ses boulettes de morue.

...A la **famille Carrara**, à **Massimo**, ainsi qu'à tous les **habitants d'Erto**, pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse lors de mes campagnes sur le terrain.

...A **Claude**, l'autre moitié de notre classe, pour tous ces moments passés ensemble durant ces années d'étude sans même se disputer.

...A **Esther, Laureline, Michèle, Jean-Luc, Joe, Simon et Tomaso** pour les bons moments passés en leur compagnie.

...A **John, Pat et Sam**, pour le slam et le reggae dans le bureau E008.

...Ainsi qu'à tous les **étudiants, assistants et professeurs**, pour les excellents moments passés lors des nombreuses excursions et camps de terrain qui ont rythmés nos années d'études.

...A **Elodie**, pour m'avoir supporté durant les périodes d'examens et de rédaction.

...Et enfin, à **mes parents**, pour leur soutien tout au long de mes études.

RESUME

L'extinction en masse survenue à la limite Crétacé–Tertiaire est caractérisée à grande échelle par plusieurs facteurs, tels qu'une activité volcanique intense (Deccan), dont le maximum se situe proche de la fin du Maastrichtien, des fluctuations climatiques et eustatiques, ainsi que par plusieurs impacts météoritiques avant et à la limite. L'enregistrement sédimentaire a été étudié dans les Alpes du Sud sur la section de La Spesse (Province de Pordenone, Italie du Nord) entre septembre 2004 et juin 2006. Cette coupe a été échantillonnée en détail et a permis une étude précise des dépôts proches de la transition. Dans ce travail, les échantillons ont été étudiés grâce à des analyses de microfaciès, biostratigraphiques, minéralogiques, de la géochimie, de la matière organique, ainsi que du phosphore. De plus, une cartographie de la région étudiée a également été réalisée. Ce travail a été effectué sous la direction du Pr. ass. Thierry Adatte de l'Université de Neuchâtel.

Les sédiments étudiés se sont déposés dans le sillon de Belluno à des paléop profondeurs comprises entre 1500 et 3000m. En effet, la section de La Spesse présente des faciès marno-calcaires pélagiques caractéristiques d'un bassin profond. La limite Crétacé–Tertiaire est surmontée quant à elle, par une couche argileuse variant entre 2 et 4 cm d'épaisseur (biozone P0). Un hiatus est révélé à son sommet en observant l'assemblage des foraminifères planctoniques en lames minces durant le Danien précoce. Les échantillons présents dans la coupe de La Spesse débutent dans la biozone CF1 et se poursuivent jusqu'à P3 ou P4.

Le contenu minéralogique de l'ensemble des échantillons étudiés est très riches en calcite et toujours relativement pauvres en quartz et phyllosilicates, suggérant un épisode de haut niveau marin. Cependant, un renforcement de l'influence du continent est observé dans le haut de la coupe. L'assemblage des minéraux argileux montre une dominance de la smectite, traduisant un climat semi-aride à saisons contrastées. Un climat plus froid et sec, favorisant l'altération physique, est observé dans les premiers dépôts du Tertiaire. Plus haut dans le Danien, une diminution des smectites en faveur de la chlorite et de la kaolinite pourrait indiquer une période d'intensification du détritisme, ces 2 minéraux se formant sous des conditions climatiques distinctes.

Les éléments caractérisant les conditions redox (V, U,...) ont été étudiés grâce à une étude ICP-MS et semblent augmenter à la limite, indiquant une légère anoxie. L'augmentation d'une partie des éléments traces avant la limite (Zn, Ni, Mo, Mn, Cr, Co, Pb) pourrait être due au volcanisme du Deccan. Malheureusement, les résultats de ces analyses géochimiques montrent une remobilisation diagenétique de certains éléments à la limite, ce qui complique les interprétations.

De plus, les teneurs en matière organique ne sont pas utilisables pour les sédiments constituant la coupe de La Spesse car les valeurs obtenues sont nulles, ce qui est sans doute dû à une bonne oxygénation du milieu, mais surtout à une dégradation de la MO lors de l'orogénèse alpine.

Enfin, l'examen du phosphore indique une baisse de l'accumulation de cet élément suivie par un crash à la limite KT et une augmentation progressive des concentrations dans les premiers centimètres du Danien, indiquant probablement une reprise de la productivité après le stress survenu à la transition Crétacé–Tertiaire.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 But et méthodes

Cette étude, effectuée sous la direction du Pr. ass. Thierry Adate, est consacrée à l'étude de la limite Crétacé–Tertiaire (KT) dans la section de La Spesse, proche de Longarone en Italie du Nord. Différents procédés ont été utilisés :

- a) L'analyse de la composition minéralogique des roches et des argiles grâce au diffractomètre à rayons X, afin d'obtenir des indications sur les conditions environnementales de l'époque.
- b) L'étude biostratigraphique, afin d'observer l'évolution et l'extinction des différentes espèces de foraminifères et de déterminer les âges relatifs des échantillons.
- c) L'évaluation de la teneur et du type de matière organique grâce à une analyse Rock-Eval.
- d) L'étude lithologique et sédimentologique ainsi que des observations microscopiques de lames minces.
- e) Les analyses géochimiques grâce à l'appareillage ICP-MS, afin de déterminer la teneur des éléments présents dans les échantillons.
- f) L'examen des teneurs en phosphore total a également été effectué, afin d'avoir des indications sur la paléoproduktivité.

Les travaux de laboratoires ont été réalisés à l'université de Neuchâtel, la détermination des foraminifères à l'université de Princeton par G. Keller et à l'université de Ferrara par V. Luciani. Le travail de terrain a consisté dans un premier temps à lever la coupe et à l'échantillonner précisément durant le mois de septembre 2004. La cartographie géologique de la région a été effectuée lors d'une seconde campagne l'année suivante. Les cartes ont été réalisées grâce à un programme informatique de type SIG (Système d'Information Géographique).

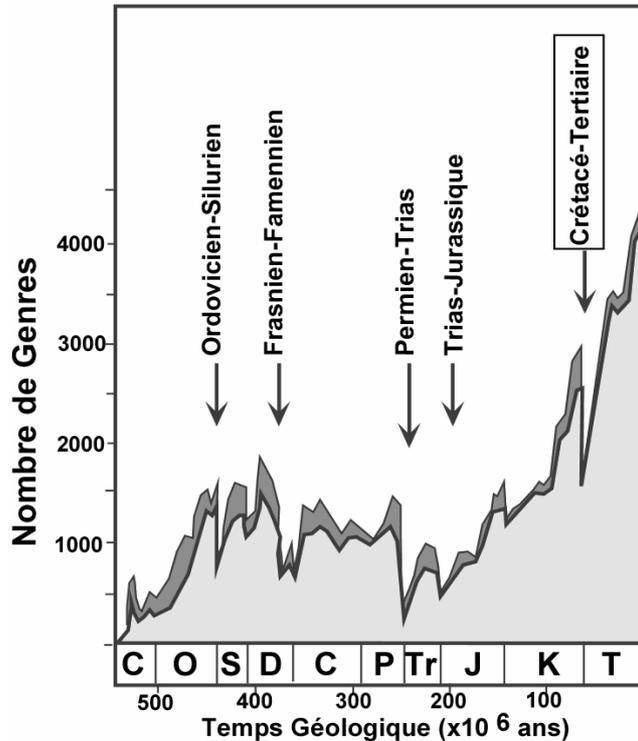
1.2 La limite KT

1.2.1 Introduction

Le passage de l'ère Mésozoïque au Cénozoïque est sans doute la plus médiatique des 5 crises biologiques majeures qui ont modifié l'histoire du phanérozoïque. Elle est très connue et

étudiée car elle est la plus récente et est associée à la disparition des dinosaures, mais aussi de plus de la moitié des espèces peuplant la terre à cette époque (cf. **Fig 1.1**).

Diversité des genres au cours du Phanérozoïque construit sur 84 intervalles de calculs



En gris clair : Genres (18'130) durant au moins 2 intervalles de calculs.
En gris foncé : Tous les genres recensés (33180).

Fig 1.1 Evolution du nombre de genres durant le Phanérozoïque.
 (modifiée selon Sepkoski, in Walliser, 1996 par T. Adatte, 2003)

Cette période correspond également à plusieurs changements globaux importants dans l'histoire de la terre. En effet, la fin du Crétacé correspond à une phase de volcanisme intense (Trapps du Deccan) et d'extension des rides médio-océaniques (poursuite de l'ouverture de l'Atlantique). De plus, cette transition est accentuée par la détérioration des climats chauds et humides (« greenhouse ») du Crétacé vers les climats glaciaires (« icehouse ») de la fin de l'ère Cénozoïque.

L'étude des concentrations de métaux rares dans les couches sédimentaires de la limite KT par Walter et son père Luis W. Alvarez en 1980 a révélé une teneur en iridium 100 fois plus élevée que dans les roches de la croûte terrestre. L'iridium est extrêmement rare dans les roches de l'écorce terrestre, mais relativement abondant dans les objets extraterrestres comme les météorites.

L'idée que cette extinction massive est due à une météorite a renforcé l'intérêt porté à cette période, mais suscite une controverse parmi la communauté scientifique. L'importance relative des différents facteurs externes et le caractère brutal ou graduel de cette extinction alimentent encore de nombreux débats.

1.2.2 Impact

Plus personne ne semble aujourd'hui contester la thèse de la météorite. En effet, de nombreux indices géologiques témoignent qu'un impact a bien eu lieu, il y a 65,5 millions d'années :

- a) Des marqueurs chimiques, minéralogiques et isotopiques associés à la météorite (des spinelles nickélifères formés par l'oxydation et l'ablation du matériel météoritique lors de son arrivée dans l'atmosphère et plus particulièrement un taux en iridium anormalement élevé).
- b) Des matériaux terrestres provenant du cratère et portant les stigmates de la collision : des minéraux déformés (quartz choqués) et des gouttelettes de roches fondues (tectites).

Depuis le début des années 90, le cratère lui-même semble avoir été identifié. D'un diamètre de plus de 200 km, il se situerait dans la région mexicaine du Yucatan, sous le village de Chicxulub (cf. **Fig 1.2**).

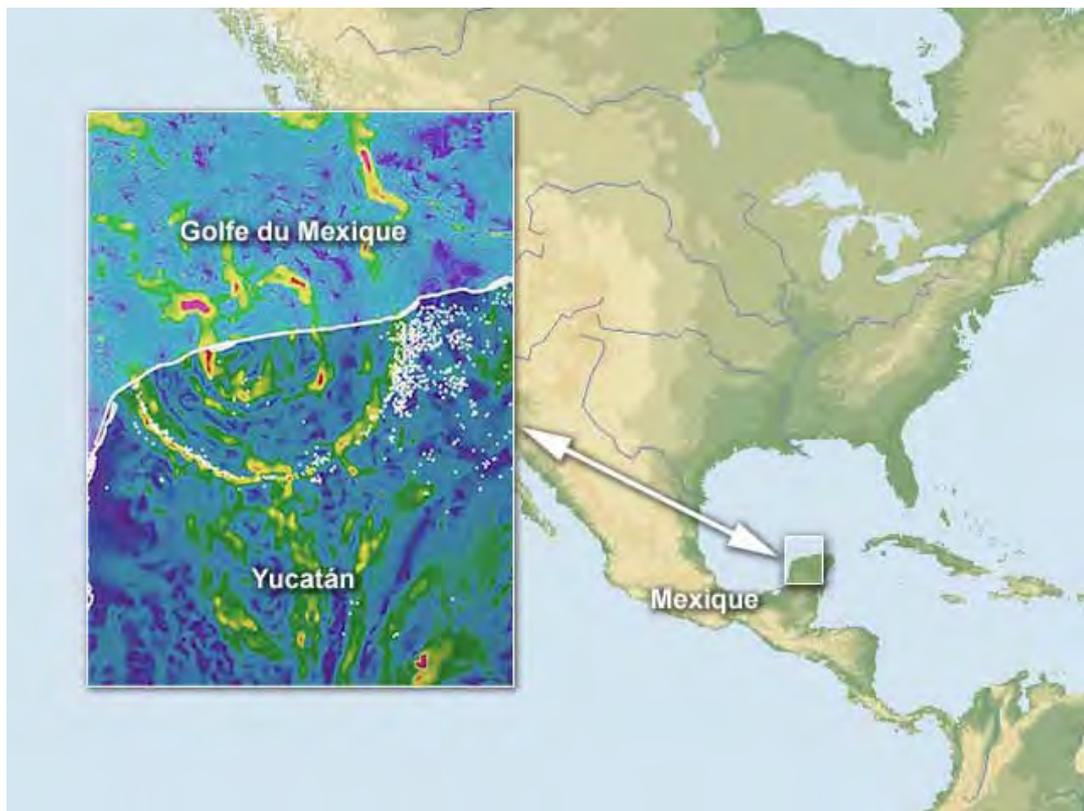


Fig 1.2 Localisation du Cratère de Chicxulub.

L'impact aurait soufflé des régions entières, créant un immense raz de marée et projetant dans l'atmosphère suffisamment de poussières pour obscurcir le sol durant des mois. Incapables de vivre sans soleil, de nombreuses plantes auraient fini par mourir, suivies par les herbivores puis les carnivores. Près de 75% des espèces marines, dont les ammonites, auraient ainsi disparu définitivement de la Terre (Dupraz, 2002).

Entre décembre 2001 et février 2002, le Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP) a mené une campagne internationale de forage sur le site de Yaxcopoil à une soixantaine de kilomètres du centre du cratère. Plusieurs équipes, dont Keller *et al.* (2004), ont pu étudier les échantillons d'une carotte comprenant la fameuse limite K-T.

Les chercheurs ont pu retrouver les traces de l'impact de Chicxulub, en particulier les tectites projetées lors du choc. Mais ils ont aussi pu constater que ces traces ne coïncident pas avec la limite K-T, riche en iridium, et correspondant à l'extinction des dinosaures. Les tectites et la couche enrichie en iridium sont ainsi séparées par une couche calcaire d'une cinquantaine de centimètres riche en microfossiles et présentant une stratification : des indices montrant qu'un phénomène de sédimentation lente a eu lieu.

Keller *et al.* (2004) montrent que le cratère de Chicxulub, identifié comme le lieu d'impact de cette catastrophe, est antérieur de 300 000 ans à la disparition des dinosaures, alors que Alvarez *et al.* (1992) affirment le contraire.

1.2.3 Volcanisme

On sait aujourd'hui que la terre a connu une période d'intense activité volcanique durant cette époque.

Une gigantesque province basaltique a été formée lorsque le microcontinent indien passa au-dessus du plume mantélique (hot spot) de l'actuelle île de la Réunion.

Dans la région du Deccan, des couches de roches volcaniques (trapps du Deccan) parfois épaisses de plus d'un kilomètre et connues pour être les plus grands épanchements de lave du Mésozoïque (cf. **Fig 1.3**), témoignent de ce volcanisme effusif 400'000 ans avant et 400'000 ans après la limite KT, avec un maximum dans le Maastrichtien terminal. De plus on distingue une très bonne relation entre les épanchements volcaniques et l'âge des extinctions (Courtilot, 1999) (cf. **Fig 1.4**).



Fig 1.3 Localisation des trapps du Deccan.

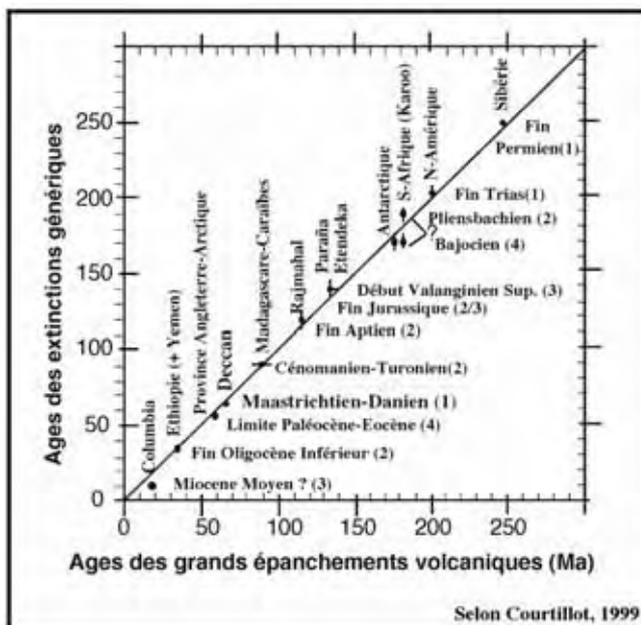


Fig 1.4 Relation entre les périodes de volcanisme intense et les extinctions en masse.

1.2.4 Fluctuations climatiques et eustatiques

On peut envisager qu'un volcanisme intense comme celui des trapps du Deccan affecte la biosphère à court terme par une baisse de la température du globe, puis à plus long terme par un effet de serre (CO₂). En effet, les poussières volcaniques dégagées lors d'une éruption de type extrusive peuvent être suffisantes pour obscurcir l'atmosphère et conduire à un refroidissement climatique généralisé. Des mesures des variations du δ¹⁸O à la coupe d'El Kef, tendent à montrer qu'un climat globalement froid s'était installé avant la limite K-T. Cependant, le volcanisme du Deccan est effusif et ne peut donc pas être la seule cause de ce refroidissement car la quantité de cendres produites par ce type d'éruption est insuffisante pour avoir un effet sur le climat à court terme. L'impact prédatant la limite KT peut avoir eu un effet supplémentaire sur l'obscurcissement de l'atmosphère. De plus, l'altération des basaltes formant les trapps du Deccan est un piège à CO₂. En effet, du calcium (Ca) est produit et se lie au gaz carbonique (CO₂), réduisant ainsi l'effet de serre. Les traces d'une régression marine ont aussi été relevées à la fin du Crétacé (Hallam, 1989 ; Hallam et Wignall, 1999).

Ces variations du niveau marin peuvent être explicables par 2 événements :

- a) Un refroidissement planétaire qui peut conduire à une mobilisation de l'hydrosphère dans les inlandsis et la calotte polaire sud.
- b) Une chute d'intensité de l'expansion aux rides médio-océaniques.

Ces 2 diminutions (température et eustatisme) ont sans doute augmenté les conditions de « stress biologiques » à l'approche de la limite KT (Li et Keller, 1998, Li *et al.*, 2000). De plus, le niveau de la mer remonte fortement 100'000 à 200'000 ans juste avant la limite, favorisant ainsi la remontée de la zone d'oxygénation minimale (OMZ) et provoquant l'extermination du plancton profond (Keller *et al.* 1995). Ce réchauffement est sans doute une conséquence à long terme dû à un effet de serre provoqué par les émissions de CO₂ du volcanisme du Deccan (Adatte, 2000).

1.2.5 Conjonction de causes

L'extinction de la fin du Crétacé n'a pas été aussi brutale qu'on veut parfois bien le faire croire. L'enregistrement biostratigraphique a montré à de nombreuses reprises l'aspect graduel de la crise (Luciani, 1997 ; Abramovich et Keller, 2002 ; etc.).

Mais la limite KT présente des traces d'iridium, un élément quasiment absent de la croûte terrestre et présent dans les corps célestes. Il y a 65,5 millions d'années, 300 000 ans après l'impact dans le Yucatan, une autre météorite (dont on ne connaît toujours pas le cratère) aurait alors porté le coup de grâce à de nombreuses espèces déjà fragilisées par les fluctuations de la température et du niveau de la mer ainsi que par le volcanisme du Deccan.

Une synthèse raisonnable des diverses données accumulées sur les événements exceptionnels de la limite KT consiste à proposer que cette crise biologique majeure serait le résultat de la superposition de plusieurs événements néfastes de longues et de courtes durées (Adatte, 2003) (cf. **Fig 1.5**).

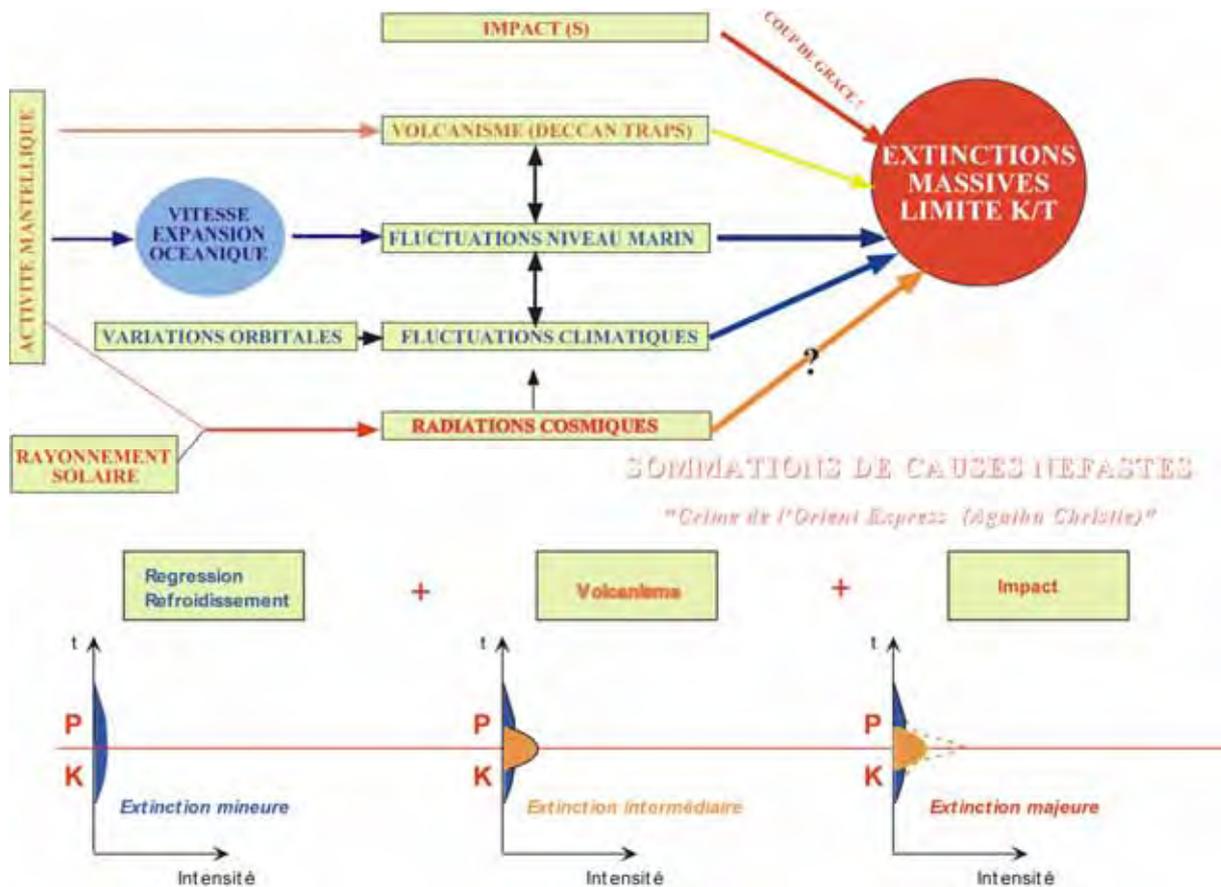


Fig 1.5 Schéma explicatif de la conjonction de causes et de la superposition de facteurs néfastes lors de l'extinction en masse de la limite KT. (modifié selon Lethiers, 1998 ; Erwin, 1993 ; Hallam et Wignall, 1998 par T. Adatte, 2003)

1.2.6 GSSP de la limite KT : Coupe de El Kef, Tunisie

En 1991, la coupe d'El Kef en Tunisie a été choisie comme Global Stratotype Section and Point (GSSP) pour définir cette transition. Cette section possède les différents critères nécessaires à la détermination de la limite KT (cf. **Fig 1.6**) :

- Le passage de dépôts souvent crayeux du Maastrichien à un lit d'argile presque dépourvu en carbonates et riche en matière organique (MO), souvent sombre, de 60 cm d'épaisseur surmonté par les marnes argileuses du Danien.
- Un mince niveau rouge-jaune (oxydation) de quelques mm à la base du lit d'argile montrant une anomalie élevée de la teneur en iridium, contenant aussi des spinelles nickélifères et des quartz « choqués ».
- Une chute du rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ des carbonates dans les basses et moyennes latitudes, interprétée comme une réduction de la productivité phytoplanctonique.

- d) Un pic en carbone organique suggérant une mortalité en masse, voir des incendies généralisés sur le continent (très controversé) (Kring et Durda, 2003).
- e) L'apparition de nouvelles espèces de foraminifères planctoniques au-dessus du niveau rouge, la disparition des espèces tropicales et subtropicales de grande taille à tests complexes et fortement ornementés, la survivance et l'apparition des espèces cosmopolites de petite taille à tests simples et moins ornementés dans le Danien (Keller *et al.*, 1996).

En 2003, la coupe d'El Kef a été déclarée en danger après la construction d'un barrage en amont. Un nouveau site devrait donc être désigné GSSP (section de référence) (Berger, 2003 ; Adatte, comm. pers.).

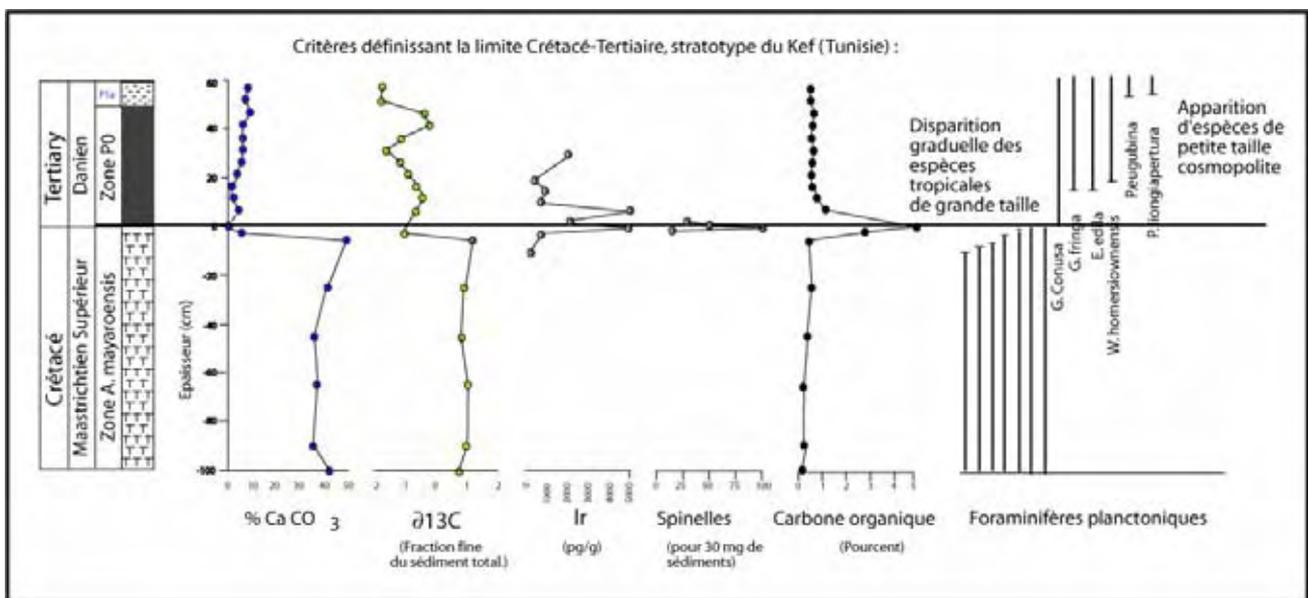


Fig 1.6 Critères définissant le GSSP de la limite KT à Kef, Tunisie. (Adatte, 2003)

CHAPITRE 2

SITUATION

2.1 Situation géographique

La section étudiée de La Spesse se trouve à côté du village d'Erto dans la vallée de Vajont (cf. **Fig 2.1** et **2.2**). Située à un peu plus de 100 km au nord de Venise dans la province de Pordenone, Italie du Nord, la coupe a pour coordonnées GPS (Global Positionning System) N 46.2731 / E 012.3631 (projection WGS 84) et pour altitude 812 m (+/- 10 m).



Fig 2.1 Localisation de la zone d'étude. (modifiée d'après le programme « World Wind 1.3 » de la NASA)



Fig 2.2 Agrandissement de la zone d'étude. (modifié d'après le programme « Google Earth »)

2.2 Histoire géologique des Alpes

Géographiquement, la chaîne des Alpes est large de 200 à 500 km, entre le plateau suisse et bavarois au nord et les plaines du Pô et de Vénétie au sud.

Depuis les premières idées d'Alfred Wegener sur la tectonique des plaques et la théorie d'Emile Argand, qui émit l'idée d'une collision entre l'Afrique et l'Europe au dépend de la Téthys qui les séparait, la géologie a progressé et leurs concepts ont été repris et perfectionnés.

La formation des Alpes a débuté au Trias. L'Afrique, l'Eurasie ainsi que tous les autres continents étaient alors regroupés en un seul supercontinent appelé Pangée, entouré par l'unique océan Panthalassa. Ce bloc va connaître une phase d'extension et commencer à se disloquer depuis le Trias jusqu'au Crétacé inférieur. Il y 220 millions d'années (Trias supérieur), la Téthys commençait à séparer la Pangée depuis l'est en deux grands continents : Le Gondwana au sud (Afrique, Amérique du sud) et la Laurasia au nord (Eurasie, Amérique du nord).

Grâce aux ophiolites, qui sont de précieux témoins dans les montagnes actuels de l'ouverture des océans aujourd'hui disparus, le Lias a été décrit comme une période de rifting intense. En plus de la Téthys, l'Atlantique central s'ouvre également à cette même période. Ces 2 océans sont liés et forment une étendue d'eau d'axe est-ouest entre Gondwana et Laurasia (cf. **Fig 2.3**). La partie active et profonde de la Téthys entre l'Afrique et l'Europe est appelée océan liguro-piémontais. A la fin du Jurassique, la fragmentation est bien évidente avec un début d'individualisation des masses continentales actuelles.

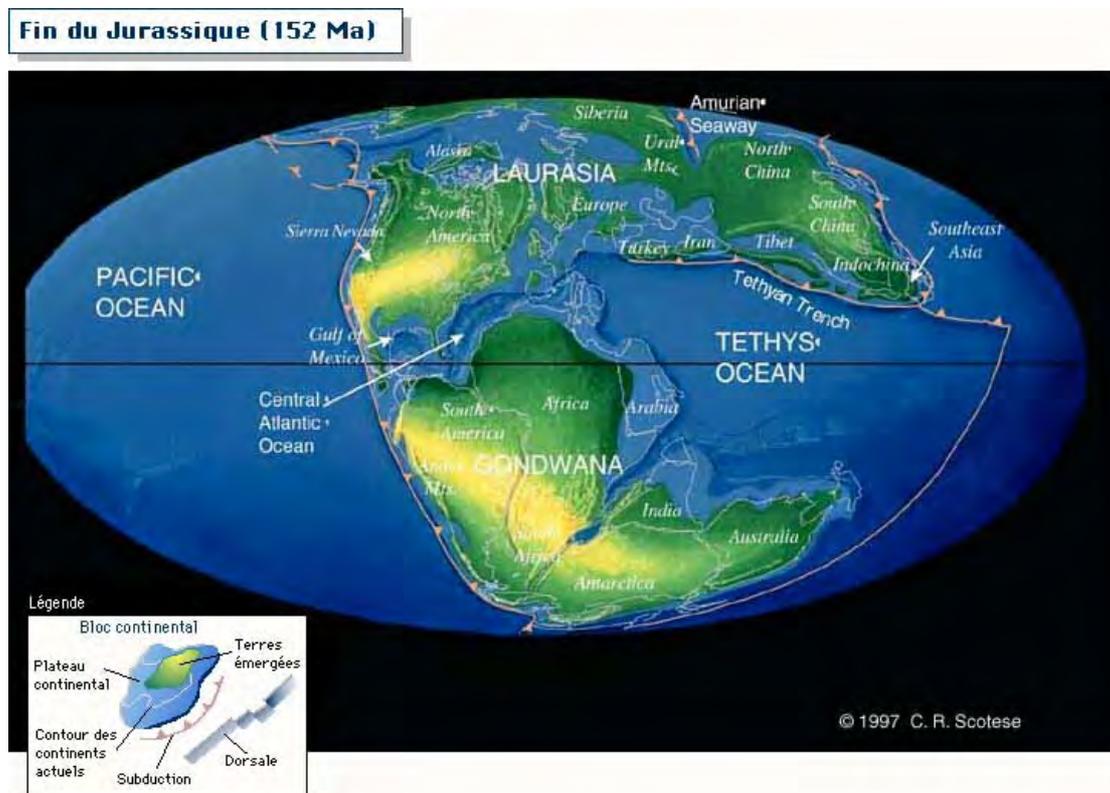


Fig 2.3 Situation paléogéographique à la fin du Jurassique. (d'après Scotese, site internet)

Au début du Crétacé, un microcontinent (Ibérie) va se détacher au nord de l’océan piémontais et migrer en direction du sud-est. L’Océan Valaisan est né.

Entre 130 et 100 millions d’années (Crétacé inférieur), une rotation antihoraire de la plaque africaine autour du « pivot » de Gibraltar est induite par l’ouverture de l’Atlantique nord. La phase de rifting est donc terminée et la subduction va la remplacer. Au milieu du Crétacé, le microcontinent Apulie se détache de l’Afrique et la marge sud de l’océan piémontais qui était alors passive, va devenir active. L’océan piémontais d’abord et le petit océan valaisan ensuite vont se refermer et « disparaître » sous l’Apulie qui migre toujours plus au nord, mettant en place l’Italie.

L’orogénèse proprement dite commence lors de la subduction de la plaque européenne à l’Eocène. Les différents domaines continentaux et océaniques vont se déplacer, se superposer, se déformer ; c’est la naissance des nappes. L’érosion et le temps ont ensuite modelé le paysage des Alpes actuelles.

Les Alpes comportent, de bas en haut, des unités d’origines européennes (incluant localement le petit océan valaisan), océanique (liguro-piémontaise) et apulo-africaine. A l’affleurement, la moitié de la chaîne alpine (la majeure partie des Alpes orientales et la totalité des Alpes méridionales) est d’origine apulienne (cf. **Fig 2.4**).

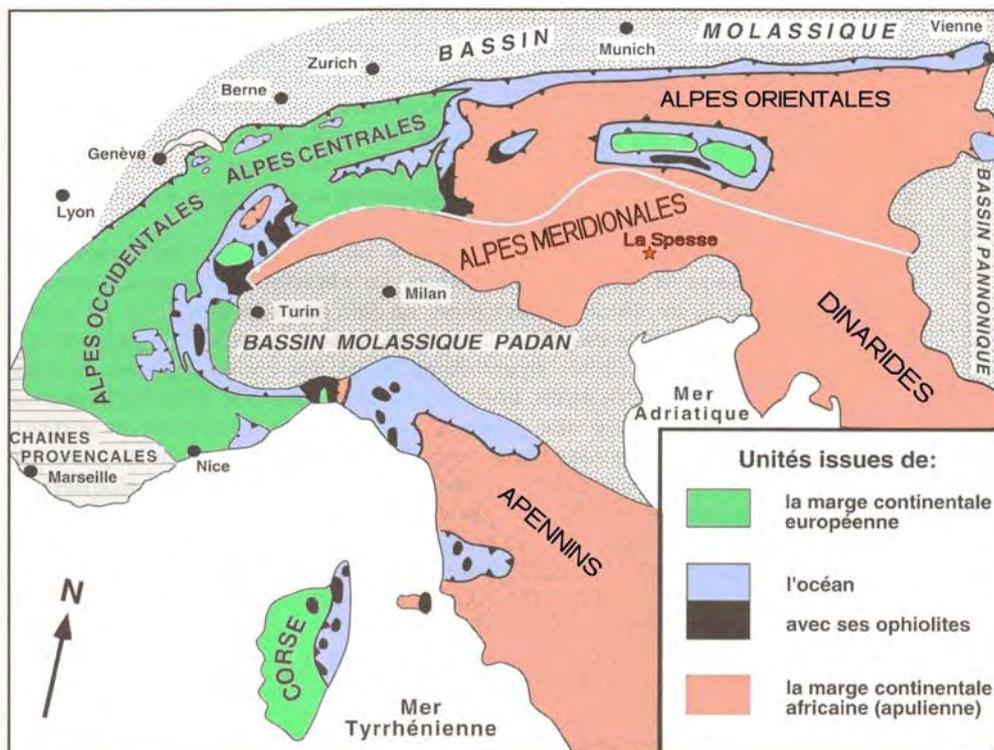


Fig 2.4 Schéma structural des Alpes, montrant la répartition des unités d’origine européenne, océanique (liguro-piémontaise) et apulo-africaine. (modifié d’après Lemoine et al., 2000)

Les différentes unités tectoniques des Alpes correspondent donc chacune à un domaine paléogéographique. L’Austro et le Sud-Alpin sont des restes de l’Apulie. Le Pennique supérieur correspond à l’océan piémontais, le Pennique moyen au Briançonnais (péninsule de l’Ibérie) et le Pennique inférieur à l’océan valaisan. Enfin, l’Helvétique et les massifs

cristallins externes correspondent à la remontée des marges de la mer et de la croûte continentale européenne (cf. **Fig 2.5**). Un important alignement de failles, appelées failles péri-adriatiques, limite au sud les Alpes orientales et centrales. Au sud de cette ligne, ou les déformations sont moins importantes qu'au nord, on se retrouve dans les Alpes méridionales, entièrement constituées d'unités apulo-africaines.

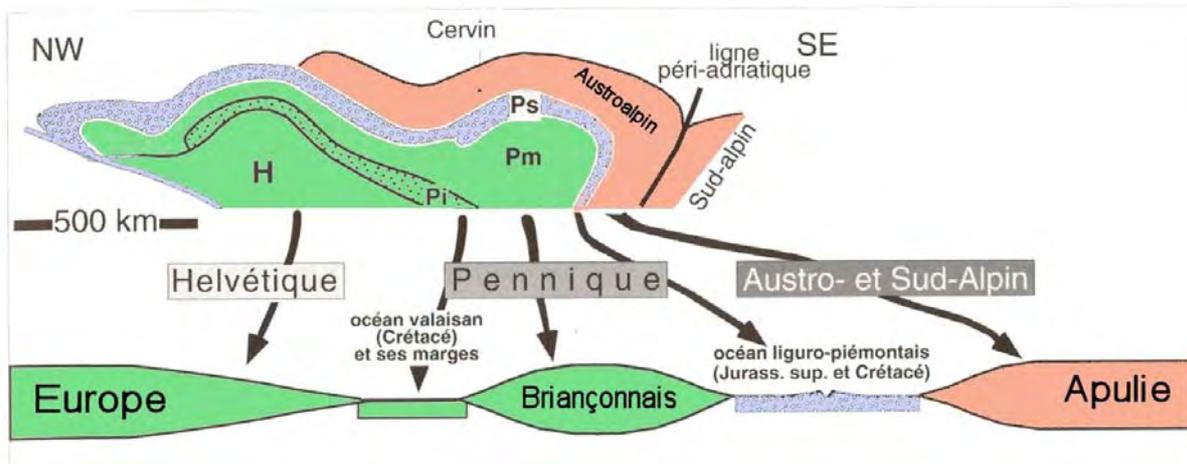
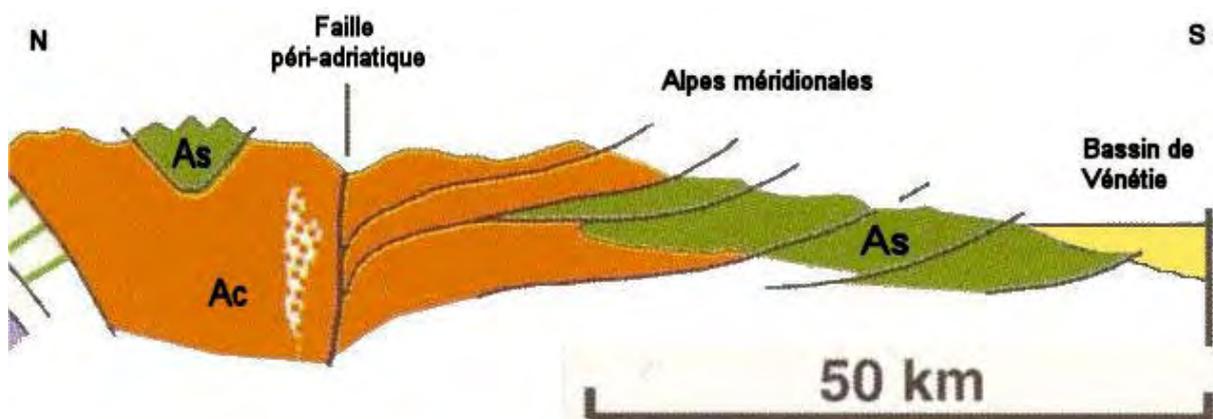


Fig 2.5 Schéma des subdivisions majeures des Alpes. En haut : Superposition actuelle des unités tectoniques. En bas : Reconstitution au Jurassique. (modifié d'après Lemoine et al., 2000)

2.3 Evolution paléogéographique des Alpes méridionales

Situées entre les failles péri-adriatiques au nord et les sédiments tertiaires et quaternaires des bassins du Pô et de Vénétie au sud, les Alpes méridionales sont affectées seulement par d'importants plis et chevauchements déversés vers le sud, pratiquement sans métamorphisme ni schistosité (cf. **Fig 2.6**).



Ac : Socle et sédiments anté-triasiques apulo-africains (Austro- et Sud-Alpins).
As : Couverture austroalpine et sud-alpine.

Fig 2.6 Coupe simplifiée des Alpes méridionales. (modifiée d'après Lemoine et al., 2000)

Au début du Lias, l'aire de la future Italie était presque totalement recouverte de dépôts carbonatés de mer peu profonde, constituant un vaste domaine de plateformes carbonatées. Avec le développement par la suite de la tectonique extensive par failles, ces aires de plateformes se réduisent et demeurent restreintes à une partie seulement de leur ancien domaine. Lors de ce rifting, qui a débuté au Trias supérieur et qui s'est poursuivi durant le Jurassique inférieur et moyen, la zone d'étude était située aux abords de la marge continentale apulo-africaine. Les différents domaines paléogéographiques de cette marge sont limités au SE par *la plateforme carbonatée du Frioul*, domaine de mer peu profonde du Trias au Crétacé, donc durant les périodes anté-rift, syn-rift et post-rift.

Au NW de celui-ci, 4 domaines paléogéographiques majeurs se sont différenciés pendant le rifting du Lias-Dogger (cf. **Fig 2.7, 2.8**):

Le sillon de Belluno : Ce bassin a été rempli par des sédiments gravitaires riches en calcaires marneux et en silex provenant du Frioul à l'est et du Trentin à l'ouest. Comme faciès de bassin caractéristique du Jurassique, on peut citer les calcaires rouges à ammonites (Ammonitico Rosso) et des radiolarites (Formation de Fonsazo).

Le plateau sous-marin du Trentin : Sédiments calcaires de mer peu profonde mais sans émerision.

Le bassin lombard : Domaine large et complexe alternant entre bassins et hauts fonds.

Biellese et Canavese : Domaine complexe et mal connu, en raison du manque d'affleurements et de l'importance de la déformation alpine toute proche (à proximité de l'ancienne limite continent-océan).

Encore plus au NW se trouvait le domaine océanique liguro-piémontais.

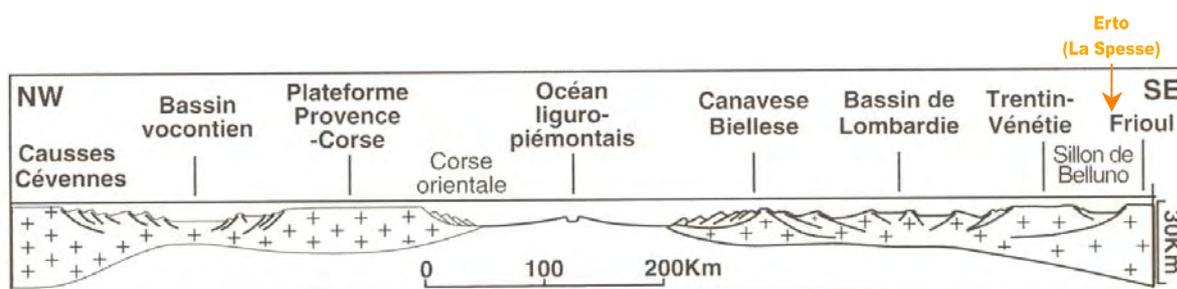


Fig 2.7 Essai de reconstitution, en coupe, de l'océan liguro-piémontais et de ses marges continentales à la fin du rifting jurassique. ++ : *Croûte continentale* (Lemoine et al., 2000)

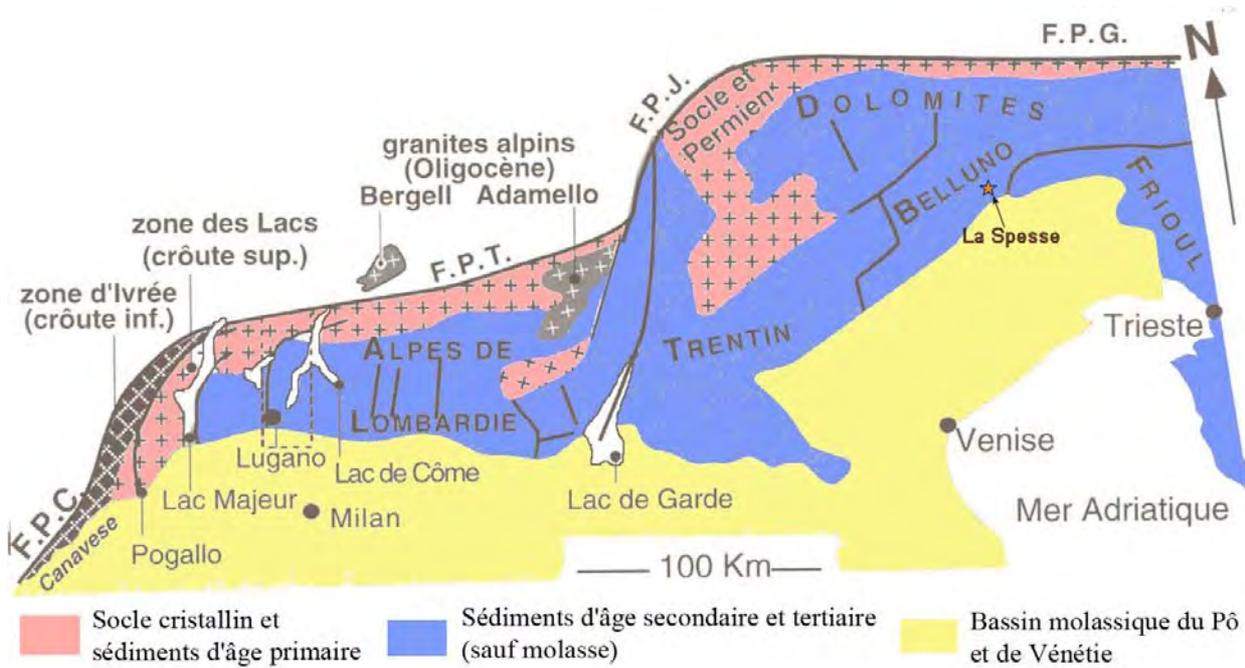


Fig 2.8 Carte de la marge continentale jurassique des alpes méridionales.

F.P : Failles périadriatiques (modifiée d'après Lemoine et al., 2000)

Ensuite, l'évolution jusqu'au Crétacé inférieur est entièrement comparable, sauf au niveau de la taille, avec celle d'une marge continentale passive actuelle. Avec l'extension graduelle de l'aire océanique, les zones marginales vont se retrouver au sein d'un bassin de plus en plus profond. Ainsi les zones de mer peu profonde sont de plus en plus réduites, et quelques plateformes seront entièrement envoyées par la mer. C'est le sort que subit la plateforme du Trentin. Les conditions de plateforme carbonatée persistent durant le Crétacé inférieur dans la plateforme du Frioul et des boues carbonatées et siliceuses se déposent dans le domaine de bassin environnant. Les témoins en sont la formation de « Maiolica » en Lombardie, du « Biancone » en Vénétie, et de « Soccher » vers la zone d'étude (cf. Fig 2.9).

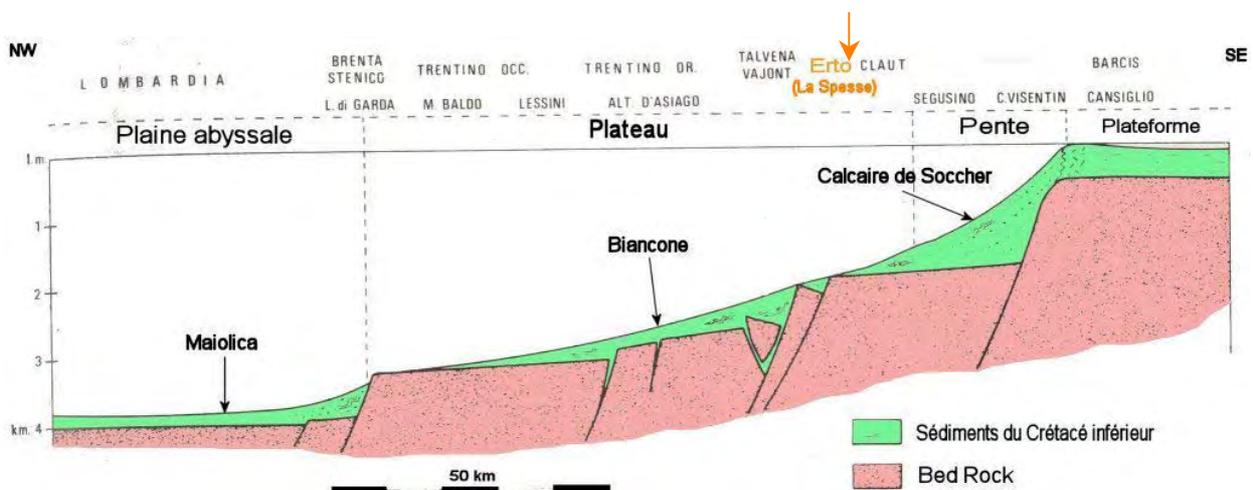


Fig 2.9 Interprétation paléotectonique de la marge du bloc continental apulo-africain pendant le Crétacé inférieur, le long d'une coupe est-ouest dans les Alpes méridionales. (modifiée d'après Bosellini, 1973)

Durant le Crétacé supérieur, la phase d'ouverture est terminée et les bordures continentales de la Téthys centrale sont en cours de rapprochement et la collision a même déjà commencé en quelques points.

De grandes quantités de matériel clastique provenant de la chaîne en formation se propagent vers le sud est, donnant naissance à plusieurs générations de flyschs alpins et sud alpins. La région des Alpes méridionales, voisine de la zone occupée par les flyschs, était le siège d'une sédimentation pélagique avec dépôt de la Scaglia Rossa (cf. Fig 2.10). Vers l'est, ce domaine confinait à la plateforme du Frioul.

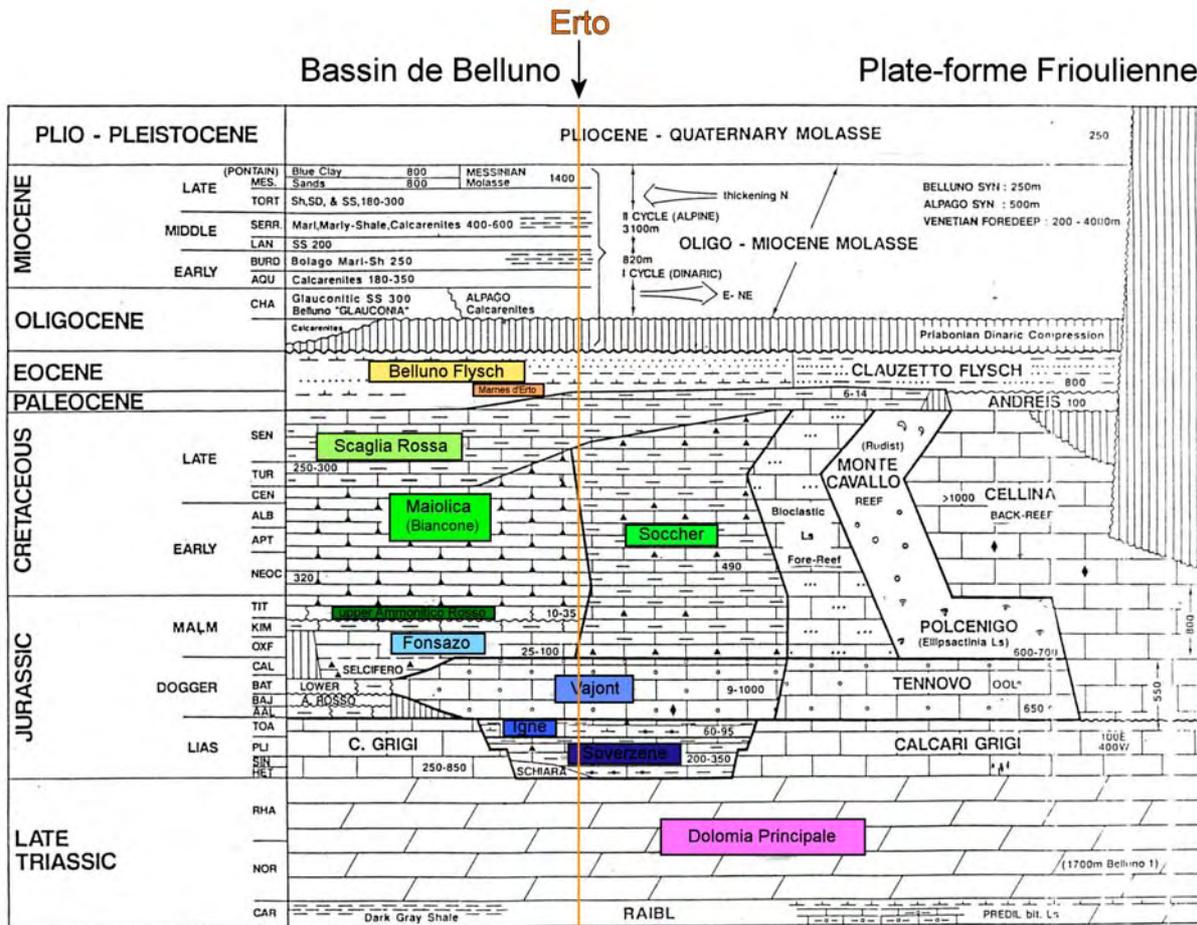


Fig 2.10 Stratigraphie généralisée de la marge continentale apulo-africaine. (modifiée d'après Zappaterra, 1990)

CHAPITRE 3

CARTOGRAPHIE

3.1 Localisation

Cette carte couvre une superficie de plus de 20 km² et est située autour de la section étudiée de La Spesse. Durant le mois de septembre 2005, 2 semaines de terrains ont été nécessaires à la réalisation de ce projet. Malheureusement, des données (principalement des photos) ont été volées lors du retour de cette campagne de terrain (cf. Avant-propos).

La cartographie a été réalisée grâce à la carte topographique au 1 :25'000 « Dolomiti di sinistra piave » éditée par la maison Tabacco. Les autres cartes utilisées pour ce travail sont les suivantes :

- « Carta geologica delle valli Vaiont e Gallina (Dolomiti Orientali)» Besio M. et Semenza E.
- « Carta geologica delle tre venezie » ufficio idrografico del magistrato alle acque, Venezia.

3.2 Géomorphologie

Le terrain cartographié est limité au nord par le Mt Borga (2228m) et au sud par le Mt Toc (1921m). A l'est, le village de St Martino (755m) est à la limite et à l'ouest, le terrain s'arrête dans la vallée du Piave, à la sortie de la gorge du torrent Vajont (452m), juste avant Longarone.

La région côtoyant le lac de Vajont peut être décrite comme un vaste synclitorium chevauché au nord par un anticlinal de vergence SSE. Un énorme glissement de terrain détaché du flanc du Mt Toc en 1963 a comblé une bonne partie de la vallée du lac Vajont.

Plus à l'est, vers le village de Pineda, une structure interprétée comme une terrasse alluviale a été observée (cf. **Photo 3.1**). Des traces d'un ancien glissement de terrain ont aussi été observées à cet endroit (Semenza E., 1959), ce qui montre que le glissement du barrage de Vajont est un événement récent s'inscrivant dans l'histoire d'un versant très instable depuis longtemps.



Photo 3.1 Terrasse alluviale de la Pineda.

3.3 Catastrophe de Vajont

3.3.1 Le désastre

Le 9 octobre 1963 à 22h39 une masse gigantesque de plus de 270 millions de mètres cube de roches et de débris s'est détachée du flanc nord du Mt Toc pour glisser à une vitesse vertigineuse de plus de 90 km/h dans le lac de retenue derrière le barrage de Vajont. L'éboulement a engendré 2 vagues : L'une s'est dirigée sur la rive opposée en balayant les villages se trouvant au bord du lac et l'autre s'est acheminée dans la gorge étroite du torrent Vajont en direction de Longarone après être passée par-dessus le barrage. La masse d'eau, après avoir pris plus de vitesse et de force dans la gorge s'est déversée dans la vallée du Piave avec une hauteur de plus de 70 m et à une vitesse de presque 100 km/h.

Longarone et d'autres villages voisins ont été littéralement rasés en l'espace de 5 minutes.

Cette catastrophe a fait un peu moins de 2000 morts.



Photo 3.2 Plaque commémorative.

3.3.2 Déroutement

Le 2 décembre 1959, en France, le rocher de fondation du barrage de Malpasset cède. La confiance placée jusqu'ici dans les rochers de fondations des barrages voûtes comme celui de Vajont est ébranlée. Lors de la construction de ce dernier, des travaux de renforcement du rocher de fondation sont effectués, mais le problème n'est pas là. En effet, le barrage a subi sans dommages les contraintes d'un débordement de plus de 200 m (cf. **Photo 3.3**).



Un manque de stabilité de la rive gauche du lac est très vite observé lors des premiers essais de remplissage durant l'année 1960. En effet, des arbres inclinés, des fissures dans le sol, des craquelures sur les façades des maisons sont apparus.

A la fin de l'année, alors que des éboulis ont glissé dans le lac, une gigantesque fissure en forme de M, qui constituera plus tard la niche d'arrachement du fameux éboulement de 1963, est formée très haut sur le flanc du Mt Toc (cf. **Photo 3.4**).

Photo 3.3 Barrage de Vajont aujourd'hui.



Photo 3.4 Vue sur la niche d'arrachement du glissement de Vajont

Les déplacements sont ensuite surveillés de près lors des différents remplissages et les vitesses sont assez stables, de l'ordre de quelques mm par jour.

Lors du troisième remplissage, une accélération est observée et la vidange du lac effectuée est supposée stopper le glissement et non aggraver la situation. Dans ces premiers jours d'octobre de 1963, les vitesses ont augmenté jusqu'à 20 cm par jour le soir du 9.

La situation a alors échappé à tout contrôle, il n'y a eu ni alerte, ni évacuation des populations alentours. La vitesse va atteindre 90 km/h, bien au-dessus des vitesses imaginées et modélisées.

Le film « La Folie des Hommes » (2001) de Renzo Martinelli raconte cette tragédie avec dans les rôles principaux Michel Serrault (architecte), Daniel Auteuil (ingénieur) et Laura Morante (journaliste).

3.4 Description des lithologies

Dolomia Principale

Cette formation la plus ancienne des affleurements des dolomites occidentales (Trias supérieur) est épaisse de plus d'1km. Elle est constituée en majeure partie de dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et forme la plupart des sommets caractéristiques de la région du même nom. En premier lieu, le calcaire s'est déposé sur les fonds marins et c'est seulement durant la diagenèse que les minéraux carbonatés (principalement le Ca de la calcite) ont été remplacés par le magnésium pour former la dolomie.

Cette unité géologique n'affleure cependant pas sur la surface cartographiée.

Formation de Soverzene

Située juste au-dessus de la *Dolomia Principale* et datée du Jurassique inférieur, cette formation de presque 600m d'épaisseur est composée par un calcaire micritique gris à brun contenant des nodules de silex. De la dolomitisation peut parfois être observée à sa base. C'est un dépôt typique de bassin.

Formation de Igne

Formation composée d'argiles noires pouvant atteindre 150m d'épaisseur. Souvent très érodée, elle a la particularité de n'être visible dans le paysage uniquement sous forme de dépressions.

Cette formation, du Jurassique inférieur également, n'a pas été observée sur mon terrain.

Calcaire de Vajont

Daté du Jurassique moyen, ce calcaire massif très fracturé est spathique et très riche en oolithes. De couleur brun clair à gris clair, il forme une grande partie des falaises de la région, pouvant atteindre 450m d'épaisseur.

Il est interprété comme étant un complexe de cônes de turbidites alimentés par la plateforme frioulane. Cette formation a rempli le bassin de Belluno puis s'est également déposée sur la plateforme du Trentin, comblant ainsi la dépression héritée du rifting liassique (Oppizzi, 1998).

Fonzaso

Unité épaisse de 10 à 40m et composée de calcaire marneux du Jurassique moyen à supérieur, riche en silice et radiolaires. C'est dans cette couche que c'est déclaré le glissement sur la rive du lac de Vajont.

Ammonitico Rosso

Cette série condensée jurassique d'environ 10m est composée par un calcaire micritique rougeâtre riche en silice et en ammonites. Il s'explique par une dissolution partielle des carbonates d'un dépôt en cours de sédimentation sur un haut-fond ou une pente sous-marine.

Calcaire de Soccher

Calcaire marno-argileux bien lité souvent plissé. Daté du Crétacé inférieur, cette formation pouvant atteindre 150m est aussi composée de nodules de silice. La stratification marquée de cette série est très appréciée par les adeptes de la grimpe, nombreux dans la région.

Scaglia Rossa

Succession de marnes et de calcaires marneux gris à rougeâtre daté du Crétacé supérieur au Paléocène inférieur. Pouvant atteindre 300m d'épaisseur, cette série forme le bas du profil stratigraphique étudié et contient la limite KT.

Cette unité géologique est formée d'organismes pélagiques (qui flottent à la surface ou nagent dans l'eau) déposés dans des zones abritées des dépôts rapides des flyschs terrigènes.

Marne d'Erto

Cette formation marno-calcaire grise à brune du Paléocène de plus de 100m d'épaisseur fait la transition entre la *Scaglia Rossa* et les *Flyschs Eocènes*. Cette série forme le haut de mon profil stratigraphique.

Flyschs éocènes

Formation gréseuse grise de l'Eocène pouvant atteindre 200m d'épaisseur. Les flyschs sont des unités détritiques typiques déposées lors de la fermeture d'un océan. Ils sont composés de séquences turbiditiques. Les figures de courant à la base de ces turbidites ont été très utiles pour définir la polarité des couches.

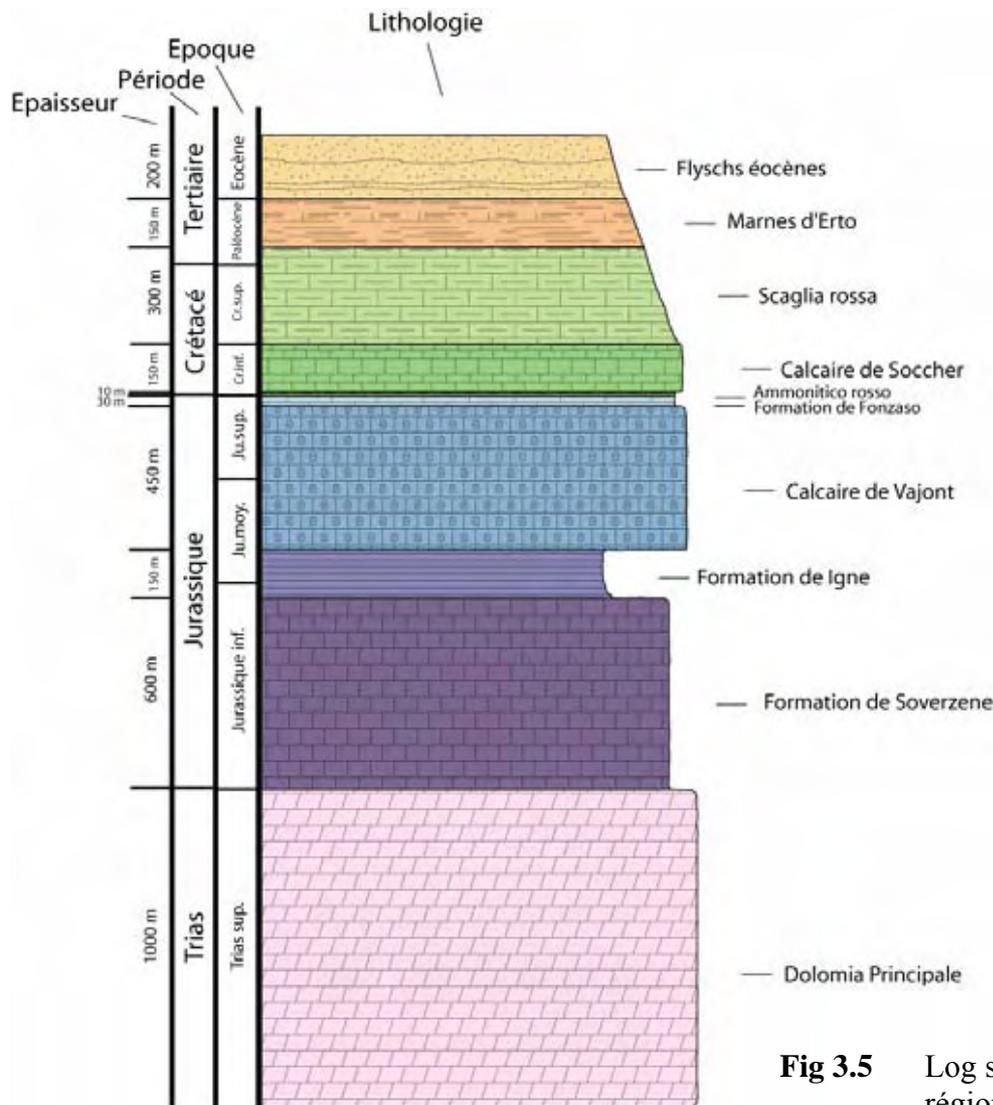


Fig 3.5 Log stratigraphique de la région cartographiée.



Photo 3.6 Vue sur une partie de l'anticlinal au NW du terrain.

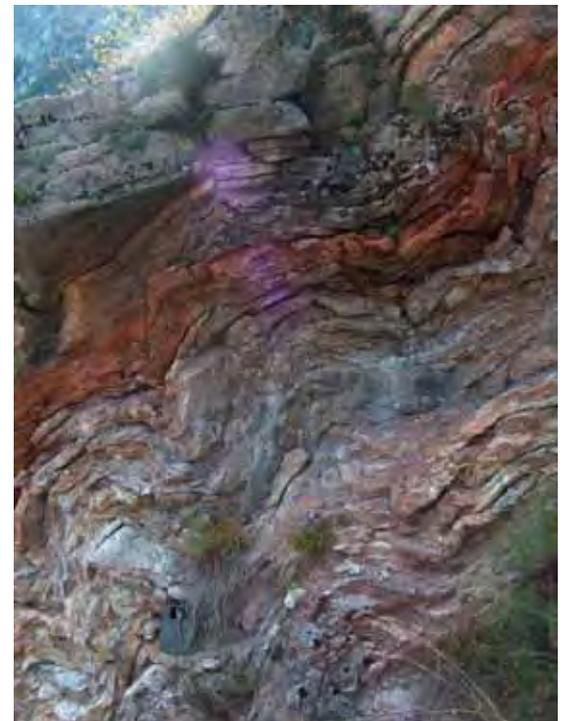


Photo 3.7 Fonzaso plissé au-dessus d'Erto.

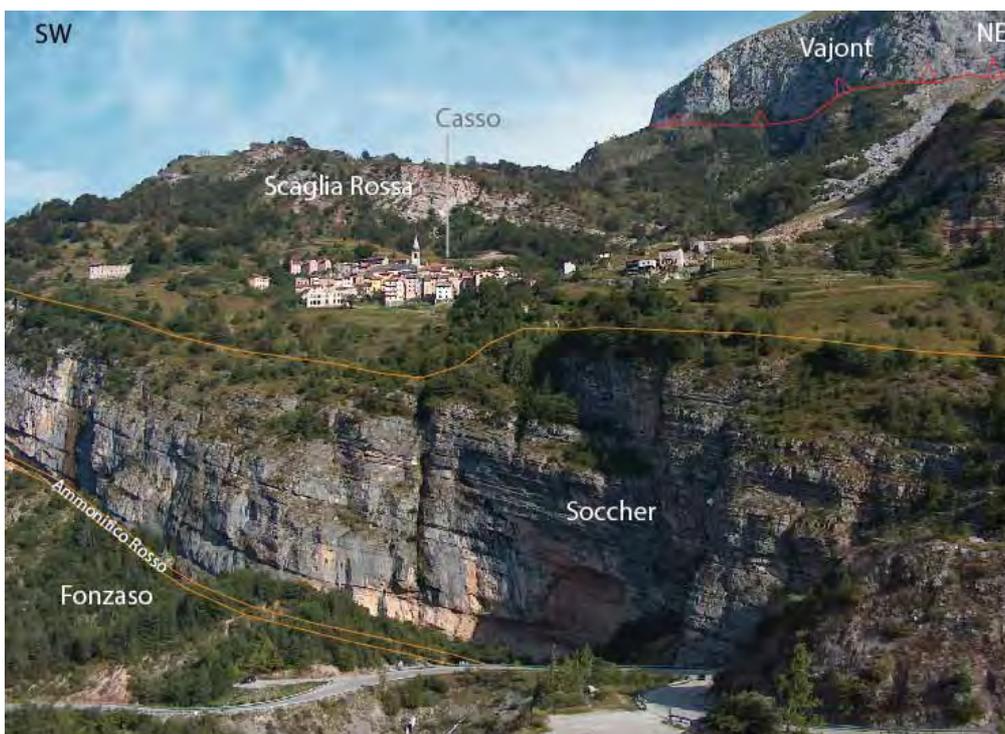


Photo 3.8 Falaise de Soccher sous le village de Casso.

3.5 Le Système d'Information Géographique (SIG)

Un système d'information géographique se définit aujourd'hui et de manière générale comme un environnement informatisé de traitement d'informations spatiales numériques et multivariées (Burrough, 1998 ; Tomlin, 1993 ; Collet, 1992 ; Caloz & Collet, 1997 ; Golay, 1992 ; Jaquet, 1996). Il prend en compte des dimensions variables qui peuvent être d'ordre thématique, spatial et temporel. Alors que de nombreux logiciels sont capable de stocker des données géographiques (Excel, Access, Adobe Illustrator,...), seul les SIG permettent d'effectuer des requêtes spatiales sur ces données, car les relations spatiales entre les différents objets y sont clairement définies (Bouzelboudjen, 2005).

Il est aussi possible d'introduire des bases de données dans les SIG, ce qui permet de combiner des informations descriptives et des informations spatiales de manière différenciée. Les SIG ne sont pas uniquement des outils informatiques servant à l'élaboration des cartes, mais surtout des outils analytiques (Bouzelboudjen M., 2001 ; El Morjani Z.,2003 ; Boker E., 2004.)

Deux logiciels ont été utilisés dans ce travail :

ArcView 3.3 qui permet d'importer et d'insérer des données sur un support cartographique préalablement digitalisé (ex. photo aérienne, image satellite, carte topographique,...) et de répondre à des requêtes définies par des contraintes imposées sur les différentes données.

ArcInfo qui développe la notion de topologie absente dans ArcView. Les objets (points, lignes, polygones) sont finalisés et reliés entre eux. Grâce à ce programme, chaque objet a une place dans l'espace et est positionné par rapport aux autres.

3.5.1 Relation entre les objets

Il existe trois modèles pour représenter la relation entre les objets (Bouzelboudjen, 2005).

- a) Le modèle spaghetti dans lequel aucune relation ne lie les objets entre eux. Ce concept des années 1960 a permis de développer les logiciels de cartographie numérique ou automatique en mode vectoriel. Autocad représente le logiciel le plus complet à l'heure actuelle.
- b) Le modèle réseau où des relations sont établies entre les lignes et entre lignes et points. Les arcs sont orientés. L'intersection entre les lignes est matérialisée par des nœuds. Ce modèle est linéaire. L'une des applications les plus connues est par exemple, l'identification automatique du chemin le plus court (ex : GPS adaptés pour les voitures). C'est un concept qui a été développé dans les années 1970.
- c) Le modèle topologique dans lequel, en plus de la relation entre lignes et points, toutes les relations entre zones et lignes et entre zones et points sont représentées. C'est le modèle développé par ESRI avec son logiciel ArcInfo en 1981.

3.5.2 Représentation des données spatiales

Deux modes sont connus pour représenter les points, lignes et polygones : Le mode raster et le mode vecteur (Bouzelboudjen, 2005).

- a) Le mode raster divise le plan en un certain nombre de cellules (pixels). Chaque élément est donc représenté par un nombre de pixels (le point est représenté par le pixel et la ligne ou zone par un ensemble fini de pixels). Plus le nombre de pixels est grand, plus la résolution est élevée et meilleure est l'approximation, mais plus la taille du fichier contenant l'information est importante.
- b) Le mode vecteur est basé sur les coordonnées des objets. La base de ce mode est le point (couple de coordonnées x et y). Les lignes sont représentées par des lignes brisées et les zones par des polygones. L'arc (ligne brisée complexe) est ainsi une séquence de points, la ligne une séquence d'arcs et le polygone une séquence de points : ses sommets.

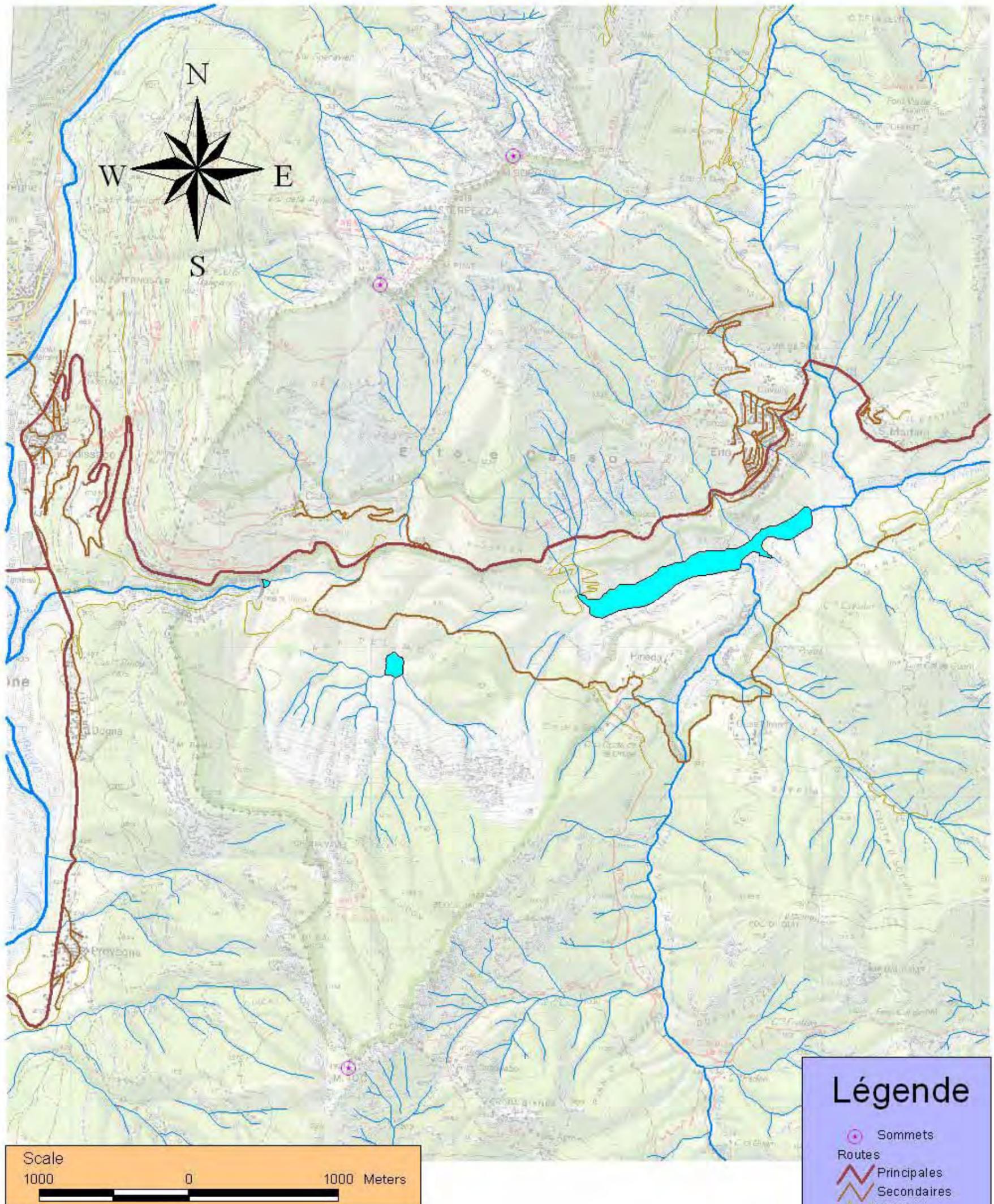
3.6 Cartes réalisées

Les différentes étapes du travail sont décrites plus loin dans l'annexe 1.

Plusieurs cartes ont été établies :

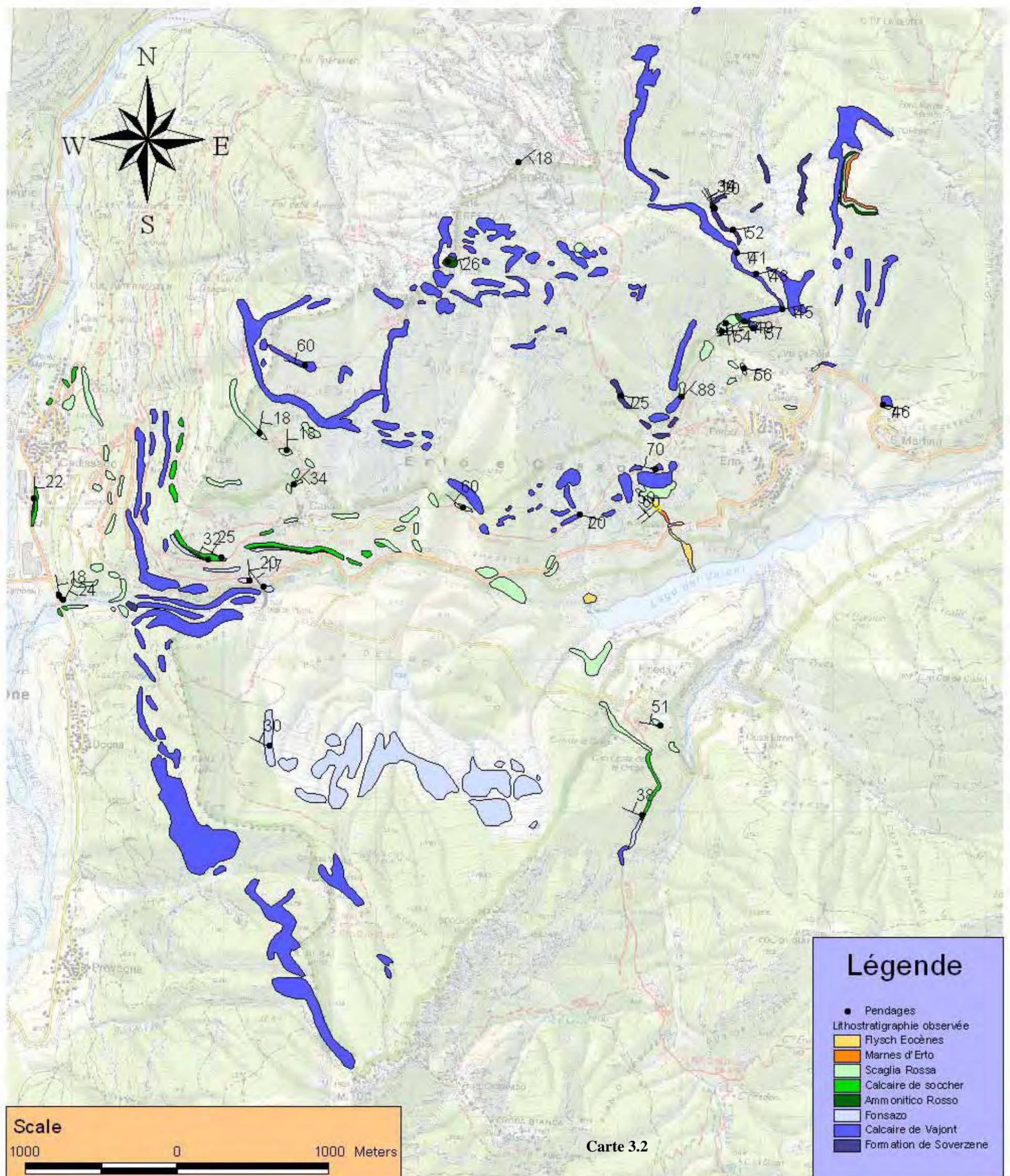
- a) Une carte topographique montrant les routes et les cours d'eau. (cf. **Carte 3.1**)
- b) Une carte des affleurements observés et des données géologiques relevées sur le lieu d'étude. (cf. **Carte 3.2**)
- c) Une carte interprétative des lithologies à partir des affleurements observés sur le terrain. (cf. **Carte 3.3**)
- d) Une carte tectonique montrant les failles et les structures principales. (cf. **Carte 3.4**)
- e) 2 coupes ont été réalisées sur la base de la carte tectonique. (cf. **Fig 3.9**)

Carte Topographique

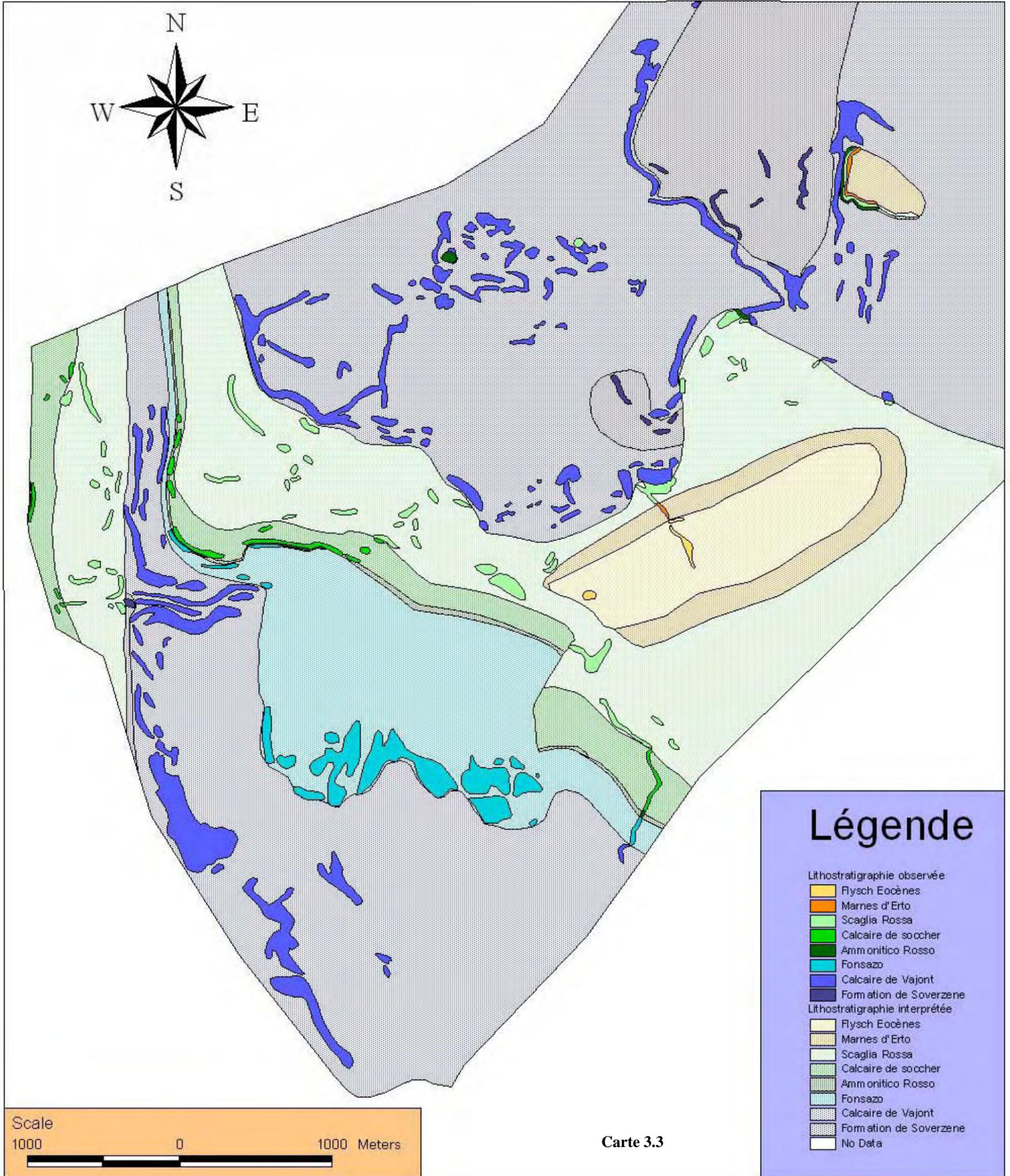


Carte 3.1

Carte des affleurements

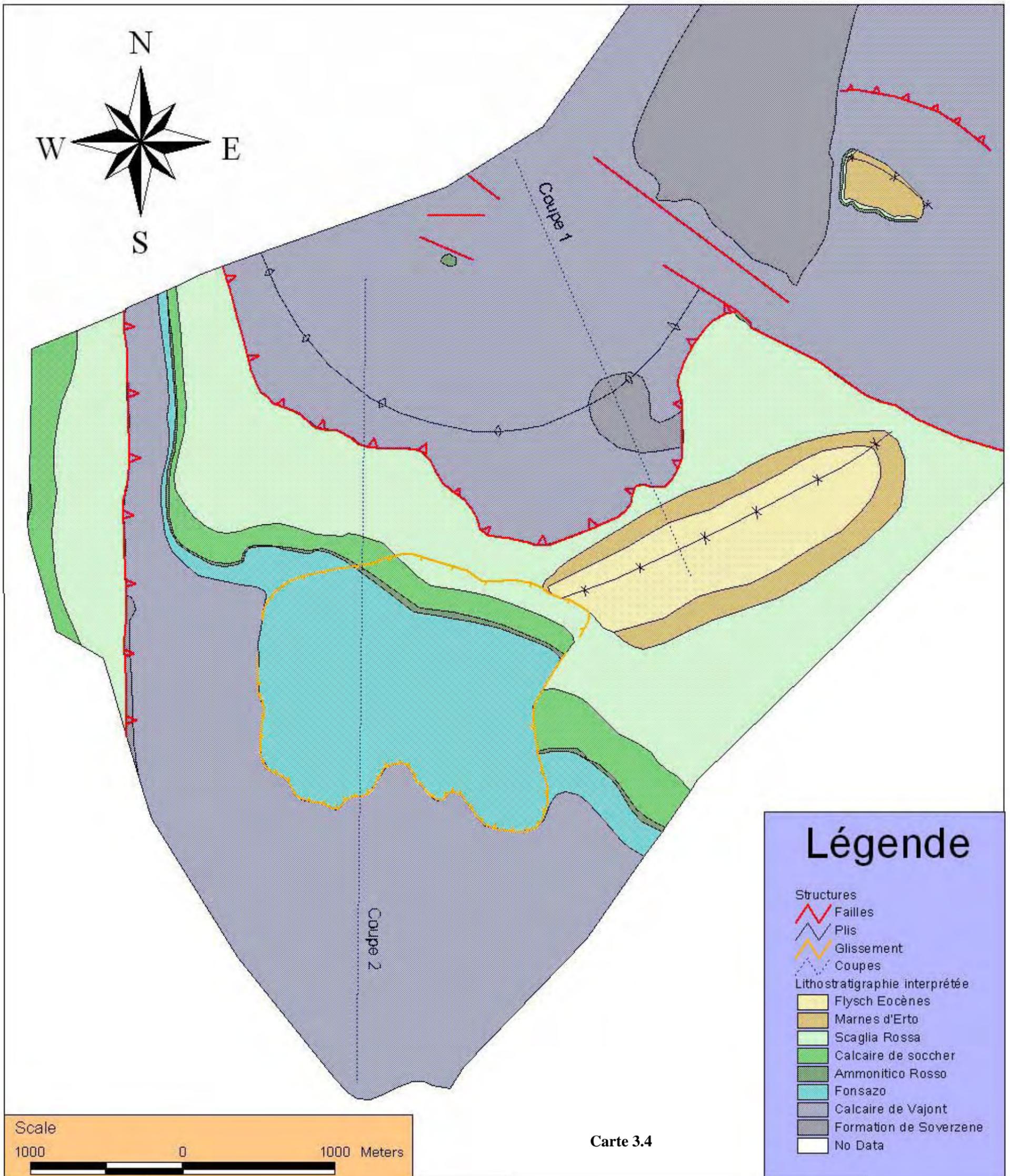


Carte interprétative



Carte 3.3

Carte tectonique



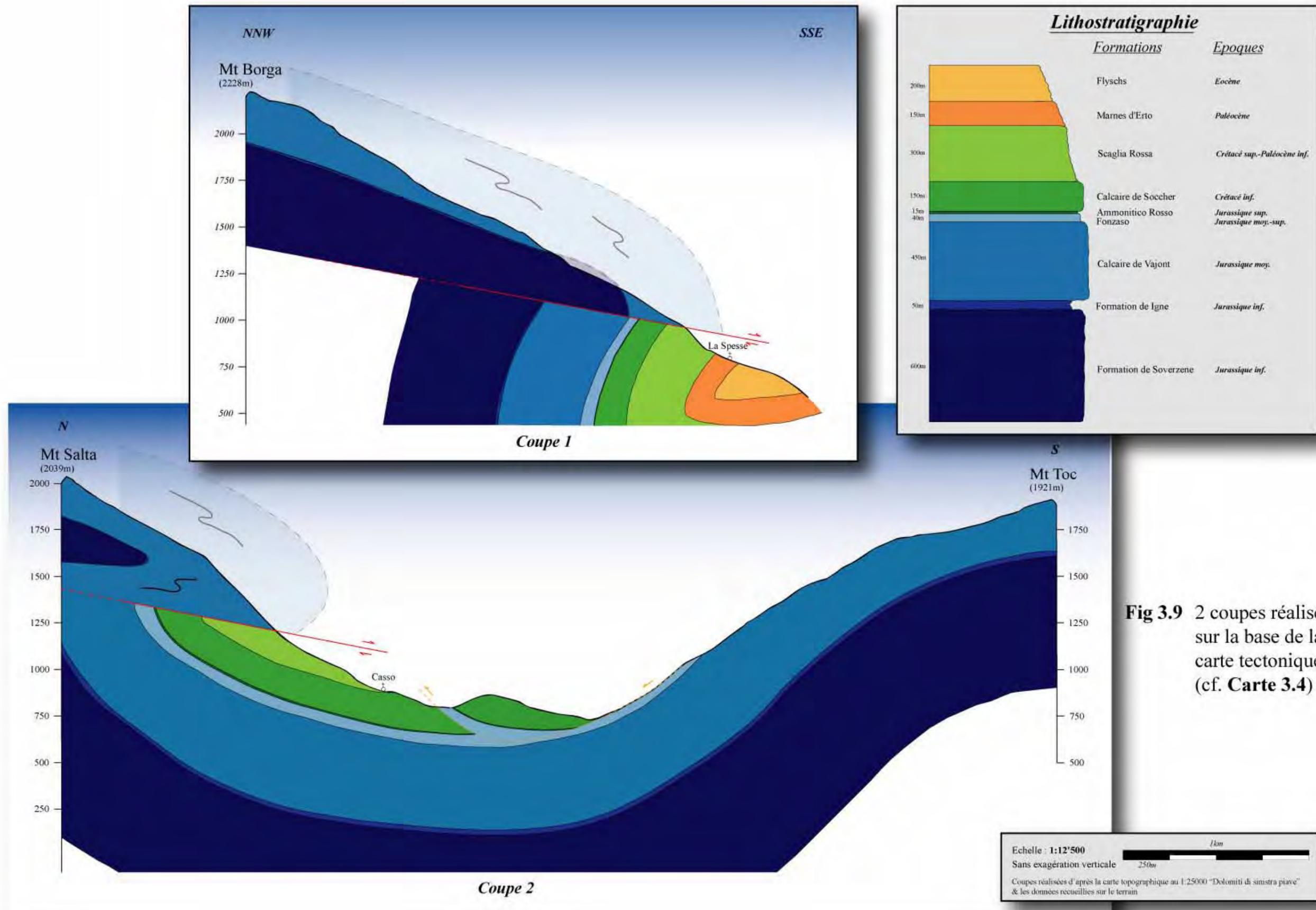


Fig 3.9 2 coupes réalisées sur la base de la carte tectonique. (cf. Carte 3.4)

CHAPITRE 4

COUPE DE LA SPESSE

4.1 Levé de coupe

La coupe étudiée est située dans le lit d'un ruisseau à une petite centaine de mètres au-dessus de la route principale reliant Casso à Erto (Luciani, 1997) (cf. **Fig 4.1**). Le tracé depuis cette route pour parvenir à la section étudiée est donc court et remonte dans le ruisseau, mais n'est pas balisé. L'accès est donc rapide mais pas sans difficultés. Cette section a été dénommée selon l'appellation locale la plus proche, le hameau de La Spesse.

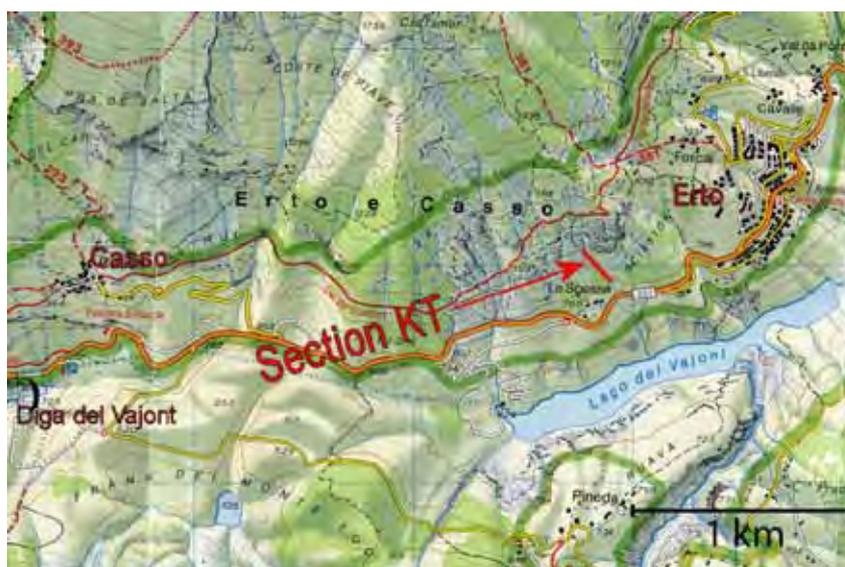


Fig 4.1 Localisation de la zone d'étude.

Quelques petits plans de faille en calcite témoignent de la tectonique cassante présente à l'échelle centimétrique. Cependant, les bancs composants la coupe sont bien continus et utilisables pour une étude stratigraphique détaillée, bien que les limites entre ceux-ci semblent parfois affectées par ces petites failles.

Un pendage d'environ 50° en direction du NW est observé, témoin de l'activité tectonique de l'orogénèse alpine dans les Dolomites.

134 échantillons au total ont été prélevés sur environ 12 mètres avec un intervalle variant de 20 cm à 1 cm à la limite KT. En effet, 80 échantillons ont été prélevés à 1 mètre de part et d'autre de la limite.



Photo 4.2 Vue générale de la coupe de La Spesse.

4.2 Description de la coupe

La coupe de La Spesse est située sur le flanc inverse d'un synclinal affectant notamment les flyschs éocènes, les marnes d'Erto et la Scaglia Rossa (cf. **Fig 4.3**). La section proprement dite est composée uniquement de roches de la Scaglia Rossa et des marnes d'Erto. Le profil stratigraphique réalisé a été corrigé et remis dans le sens normal (cf. **Fig 4.6**).

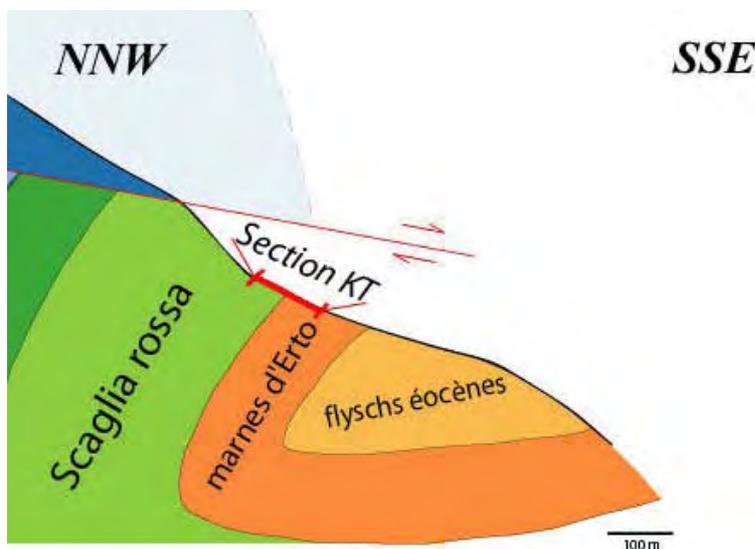


Fig 4.3 Profil géologique de la section étudiée.

La base du profil (échantillons G à F et H à I) est donc composée par la Scaglia Rossa et contient la couche argileuse de la limite KT (E1-E4 et F1-F4 (échantillonnée 2x)) qui est située à environ 1m de la base de la coupe (cf. **Photo 4.4**). 2m au-dessus de la limite, une bande d'argiles de 30cm (A1-A6) sépare des calcaires marneux rougeâtres d'autres calcaires marneux d'une couleur plus grise (J). Il s'agit sans doute de la transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (cf. **Photo 4.5**). La suite du profil est assez homogène. Dans l'ensemble, la coupe est donc constituée d'une succession de calcaires marneux plus ou moins fins, entrecoupée par quelques bancs argileux millimétriques à centimétriques.

Photo 4.4 Limite KT sur le terrain.

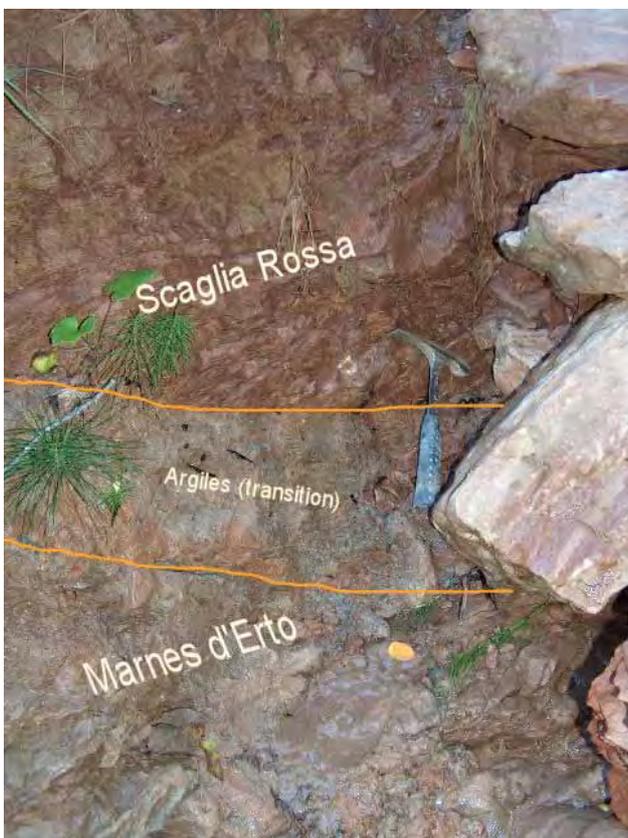
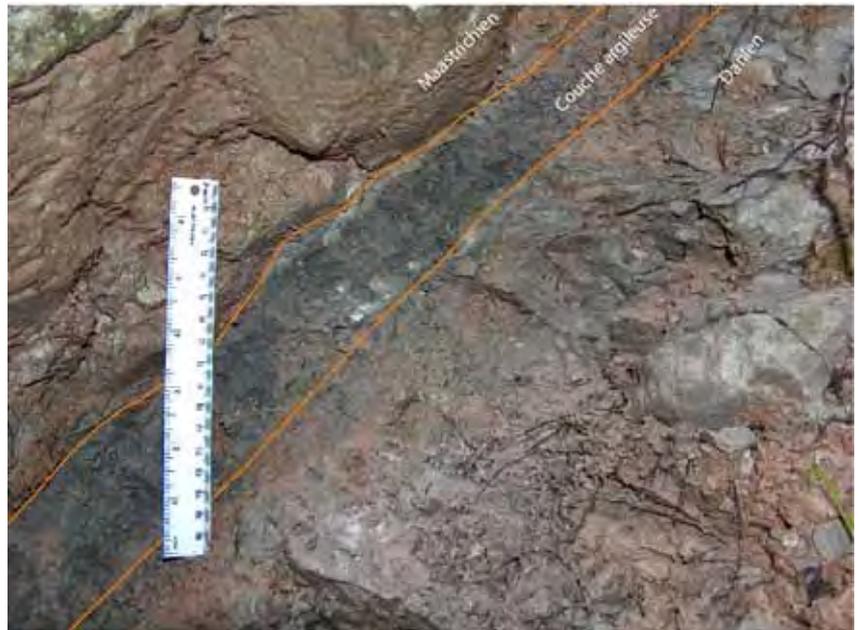
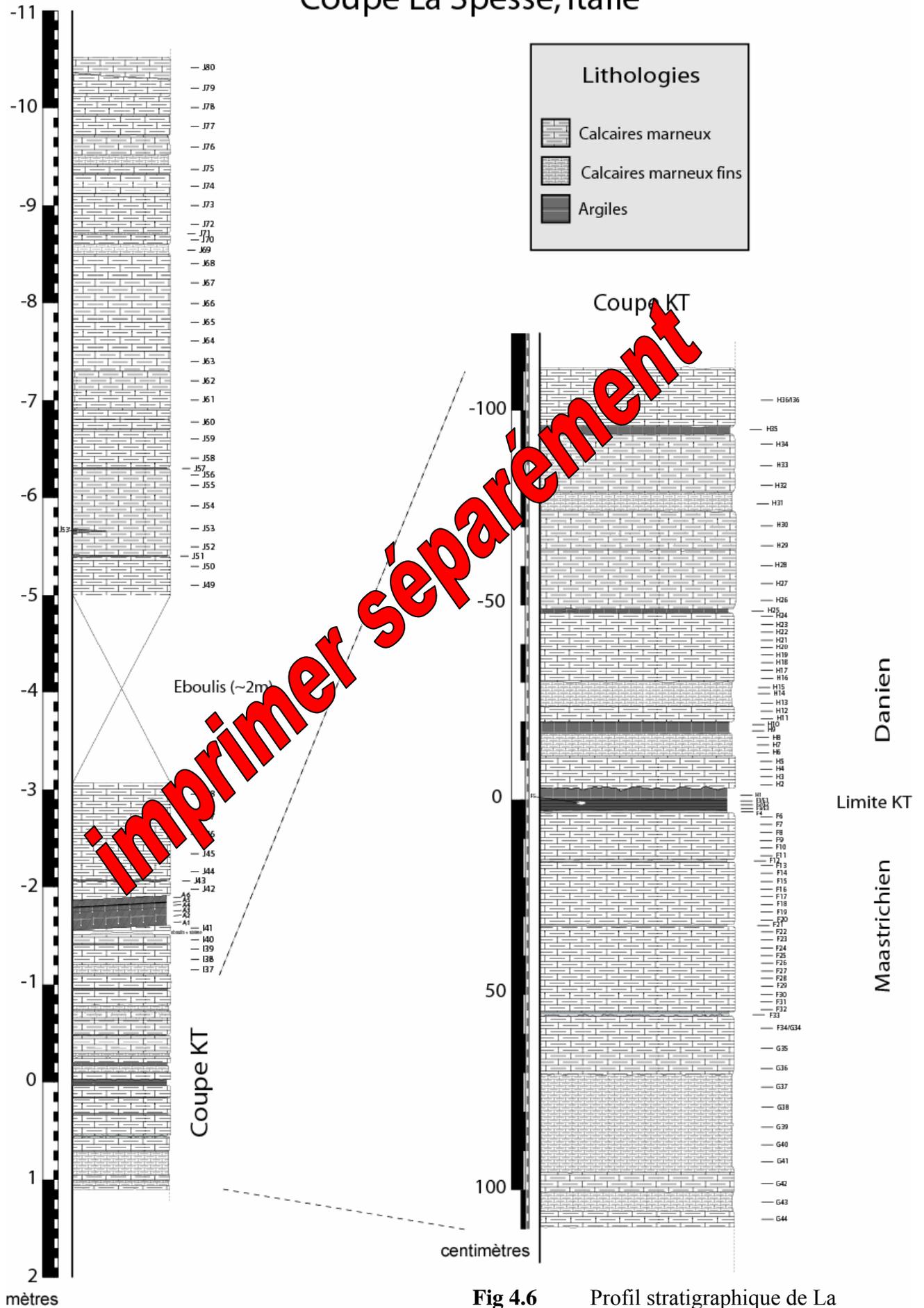


Photo 4.5 Transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto sur le terrain.

Coupe La Spesse, Italie



CHAPITRE 5

MICROFACIÈS

5.1 Méthode

L'analyse des microfaciès s'effectue sur la base de lames minces de 25µm environ observées au microscope polarisant. Les conditions de dépôt peuvent être définies grâce à la présence d'éléments lithologiques et de microfaune.

La nature marneuse des échantillons n'a permis que la réalisation de onze lames minces réparties aléatoirement le long de la coupe (cf. Fig 5.1).

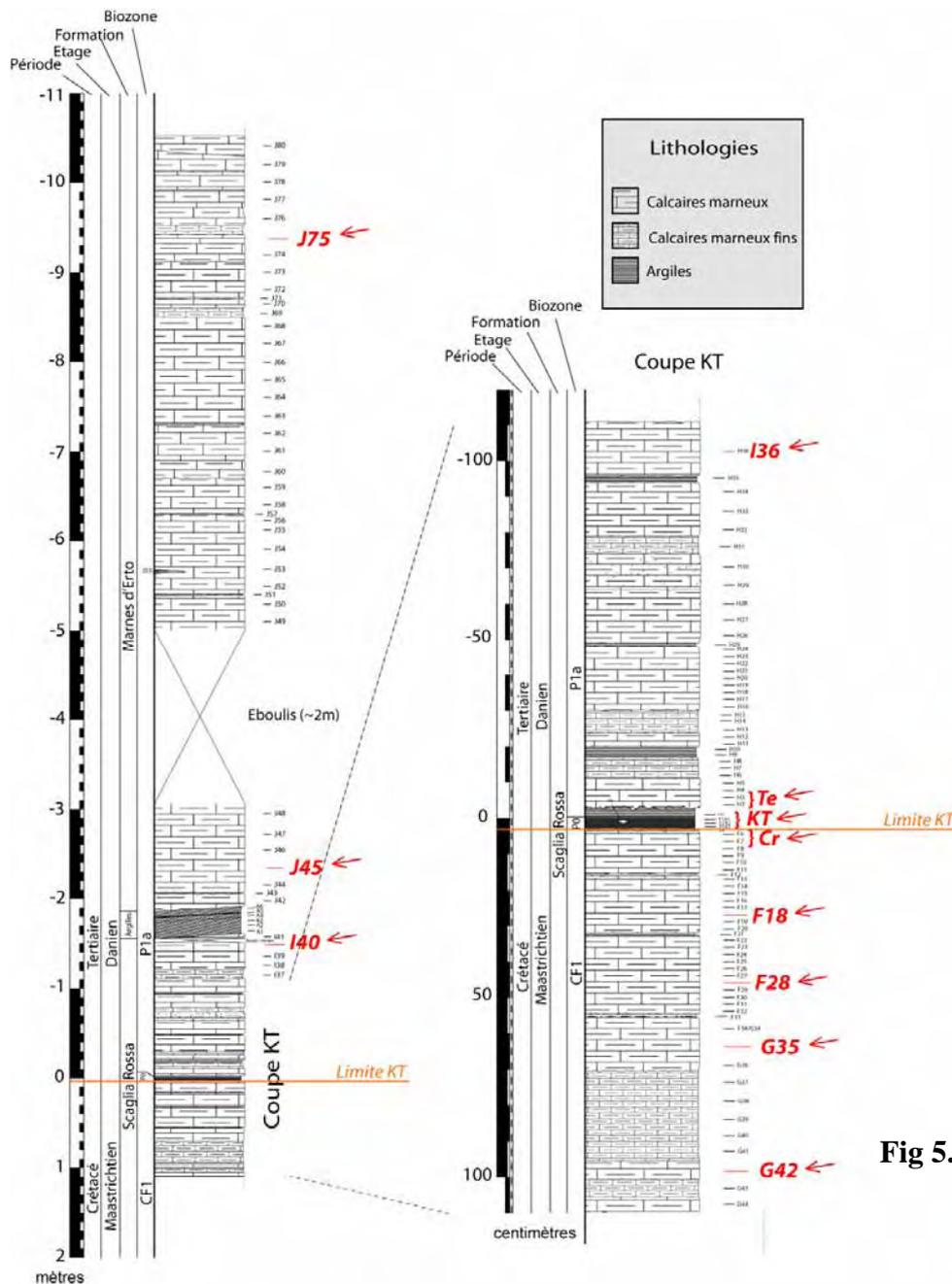


Fig 5.1 Localisation des lames minces étudiées (en rouge).

5.2 Description

5.2.1 Classification

La distinction entre une matrice (boue) et un ciment (recristallisation) ainsi que la présence de microfaune permet la classification des roches carbonatées. Deux systèmes sont couramment utilisés.

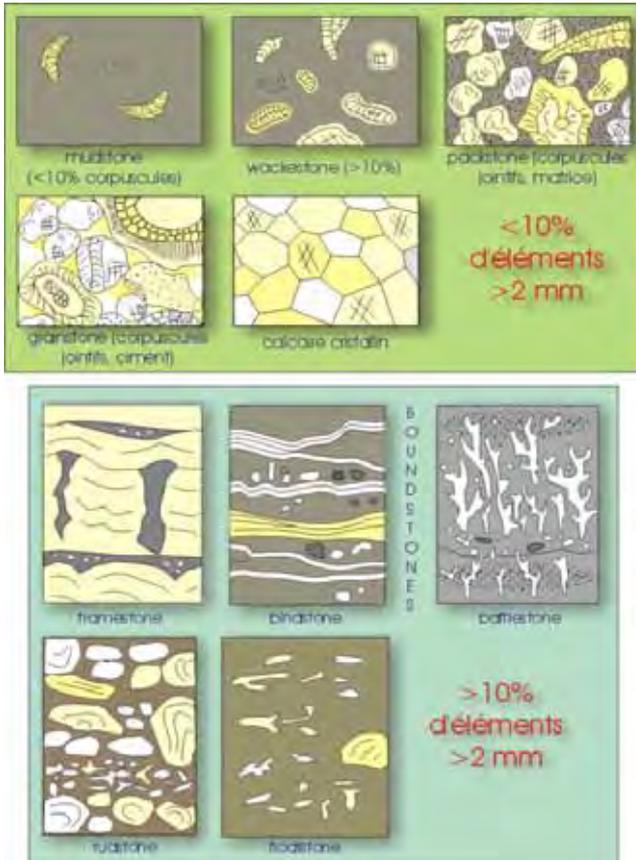


Fig 5.2 Classification de Dunham (1962), élargie par Embry & Klovan (1971).

La classification de Folk se base surtout sur la nature des bioclastes et la description de la phase de liaison (boue ou ciment) (cf. **Fig 5.3**). Dans un milieu calme, le dépôt de boue calcaire va former une matrice micritique, alors que dans un milieu agité, seul du sable sera déposé et la recristallisation des pores entre les grains va former un ciment sparitique. Ce classement est plus difficile à déterminer (lames minces) et ne définit pas clairement la texture.

La classification de Dunham décrit l'agencement des grains et la présence ou non d'une matrice (cf. **Fig 5.2**). Elle est très pratique sur le terrain, mais ne donne que très peu d'informations sur les peuplements biologiques notamment.

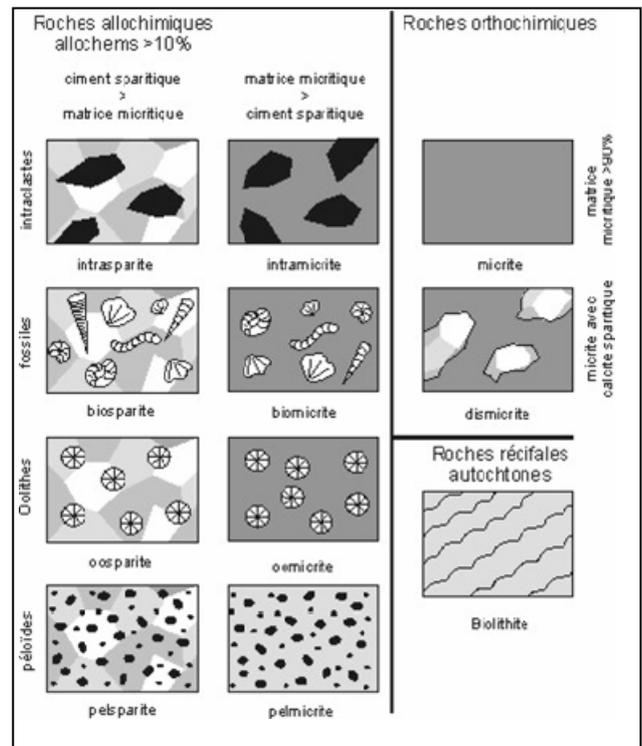


Fig 5.3 Classification de Folk (1962).

Ces deux classifications sont complémentaires et donnent des indications sur le milieu de dépôt (cf. **Fig 5.4**).

Classification		Type de dépôt	Hydrodynamisme
Folk	Dunham		
micrite	mudstone	vase	nul
biomicrite	wackestone	vase sableuse	très faible
	packstone	sable vaseux	faible à modéré
biosparite	grainstone	sable	fort

Fig 5.4 Correspondance entre texture, nature des sédiments et hydrodynamisme des milieux de dépôt.

L'action des facteurs du milieu est à l'origine de la différenciation des environnements au sein des plates-formes (cf. **Fig 5.5**). La barrière isole la plateforme interne de la plateforme externe où l'environnement est beaucoup plus stable, homogène et en liaison avec le milieu océanique. Les organismes pélagiques deviennent prépondérants et les sédiments sont généralement fins, situés sous la zone d'action des vagues.

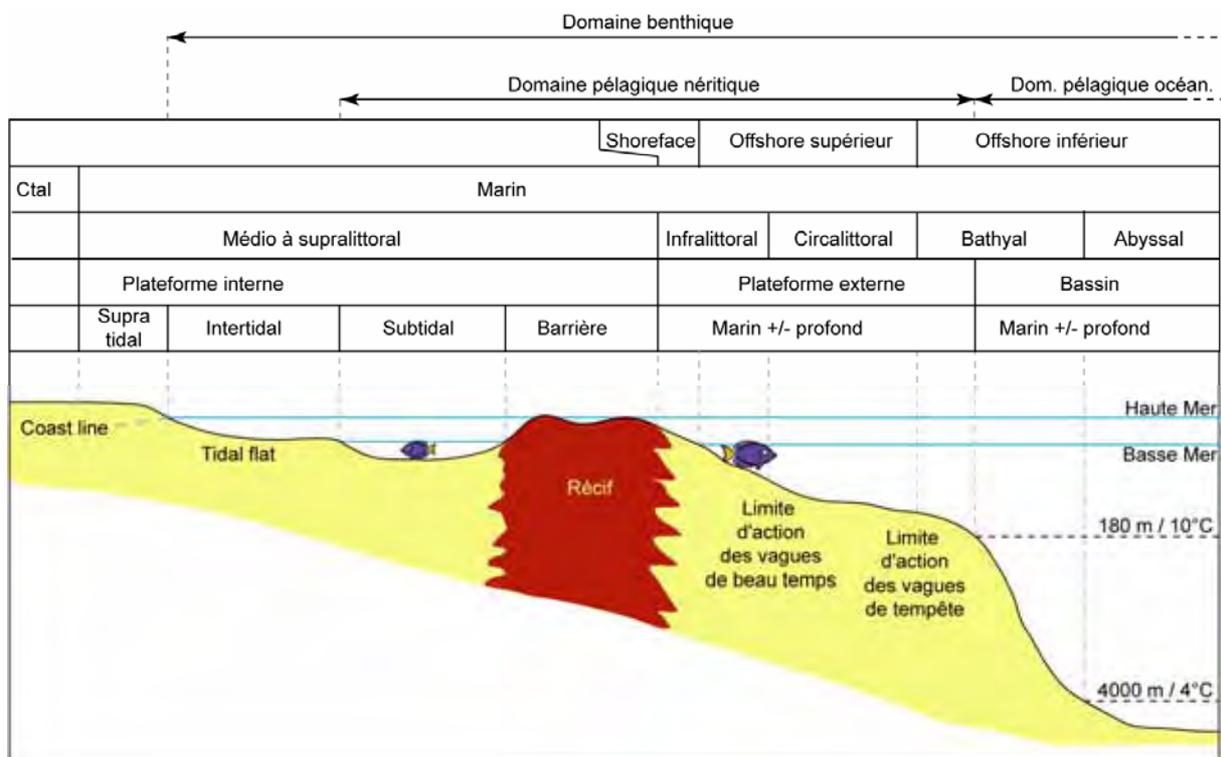


Fig 5.5 Schéma montrant la répartition des différents environnements dans une plateforme carbonatée possédant une barrière récifale.

La coupe de la Spesse contient des roches marno-calcaires qui correspondent à des sédiments déposés dans des milieux calmes, sous la limite inférieure d'action des vagues de tempête (offshore inférieur), ce qui permet, sur le terrain, d'observer des séries bien litées, parfois riches en argiles, avec des limites de bancs planes.

5.2.2 Observations

La plupart des roches qui composent la coupe de la Spesse sont d'un point de vue de la structure sédimentaire des packstones. Seules deux lames minces (Cr et Te) sont définies comme wackestones. La classification de Dunham définit la lame contenant les argiles de la limite KT comme un mudstone. Selon la classification de Folk, toutes les lames minces observées sont composées d'une matrice micritique contenant différents bioclastes (biomicrite).

Les lames minces maastrichtiennes se situant avant la limite KT (G42, G35, F28, F18, Cr) constituent un premier groupe contenant des microfossiles de formes plus importantes que dans les lames se situant dans les couches du Danien inférieur (Te, I36, I40, J45, J75). La transition entre les roches de la Scaglia Rossa et la formation des Marnes d'Erto (I40-J45) montre le passage d'une matrice foncée et rougeâtre à une matrice plus brune claire.

G42 : Calcaire marneux riche en foraminifères planctoniques de grande taille avec parfois des formes complexes (type K) relativement bien préservés. Cette abondance de microfaune dans ce packstone (à la limite avec un wackestone) ainsi que sa bonne préservation et la présence d'une matrice micritique sont typique d'une sédimentation en milieu pélagique (cf. **Photos 5.6 et 5.7**).



Photo 5.6 Lame G42.

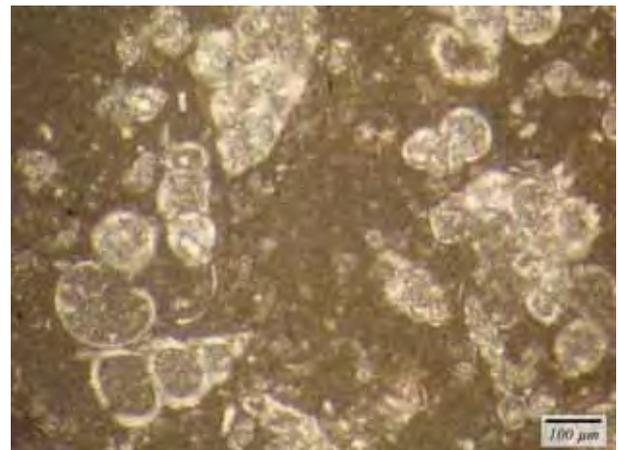


Photo 5.7 Agrandissement de la lame G42.

G35 : Ce packstone montre les mêmes caractéristiques que la lame précédente (**G42**), mais semble plus riche en foraminifères planctoniques de petites tailles (type R), plus tolérants avec des conditions de stress (cf. **Photo 5.8**).

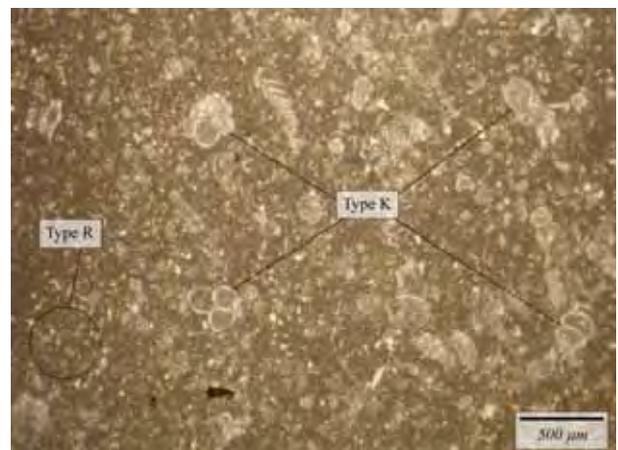


Photo 5.8 Lame G35.

F28 / F18 : Ces deux échantillons maastrichtiens possèdent les mêmes spécificités que l'échantillon **G35** (cf. **Photos 5.9** et **5.10**). Des espèces de grandes tailles (*Pseudotextularia deformis*), dont certaines à forme carénée (*Globotruncana arca*) sont présentes.



Photo 5.9 Lame F28.

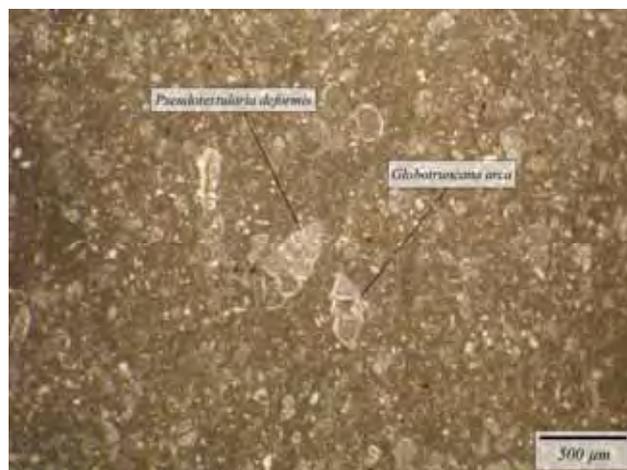


Photo 5.10 Lame F18.

Cr : Ce calcaire marneux est situé seulement quelques centimètres sous la limite KT et regroupe les échantillons F6 et F7. L'abondance de microfossiles diminue et on passe à un agencement de type wackestone. De la bioturbation est aussi observée (cf. **Photo 5.11**) indiquant la présence d'organismes benthiques et probablement d'un hiatus. Des foraminifères de grande taille possédant des formes complexes carénées (*Globotruncanita stuarti*, type K) (cf. **Photo 5.12**) sont encore présents.



Photo 5.11 Bioturbation dans la lame Cr.



Photo 5.12 *Globotruncanita stuarti* présent dans la lame Cr.

KT : La nature argileuse des sédiments à la limite Crétacé-Tertiaire a nécessité une induration, afin de réaliser les lames minces dans les meilleures conditions. Les échantillons F3, F2, F1 (couche argileuse) et H1 (Danien) y sont regroupés. Des morceaux de carbonates, sans doute diagénetiques, sont également observés dans la couche argileuse (cf. **Photos 5.13** et **5.14**).

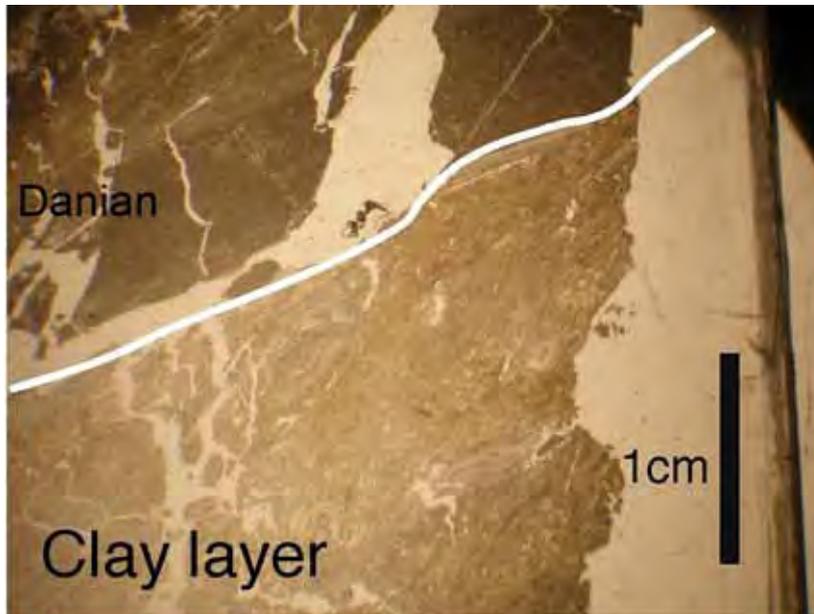


Photo 5.13

Lame KT montrant la limite entre la couche argileuse et les premiers sédiments tertiaires.

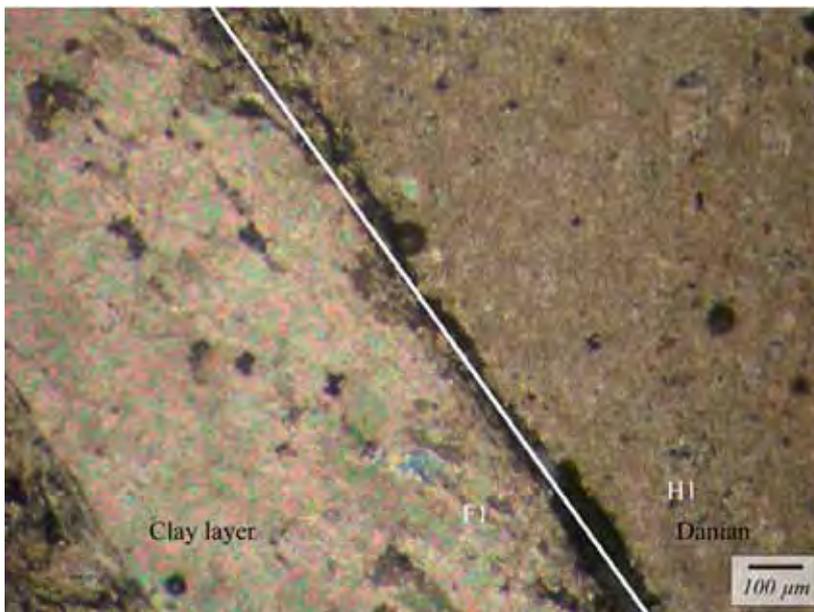


Photo 5.14

Zoom sur la limite entre la couche argileuse (F1) et les premiers sédiments du Danien (H1) dans la lame KT.

Immédiatement au-dessus de la couche argileuse, quelques foraminifères planctoniques peuvent être observés (cf. **Photos 5.15**). Une espèce de foraminifère benthique est également présente (cf. **Photos 5.16**).

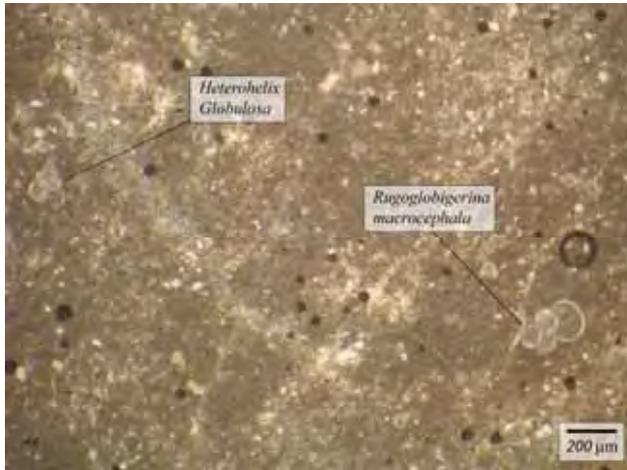


Photo 5.15 Danien de la lame KT.



Photo 5.16 Foraminifère benthique dans les sédiments daniens de la lame KT.

Te : Calcaire marneux du Danien, wackestone, ne possédant que des foraminifères de très petite taille (type R) plus opportunistes (cf. **Photo 5.17**). Cette lame regroupe les échantillons H2 et H3.



Photo 5.17 Lame Te.

I36 : Packstone à matrice micritique plus rougeâtre contenant un nombre très important de foraminifères planctoniques (cf. **Photo 5.18**). L'apparition de nombreux grains de quartz détritique est également observée, indiquant probablement une augmentation des apports continentaux. Présence également d'une forme benthique de grande taille (cf. **Photo 5.19**).

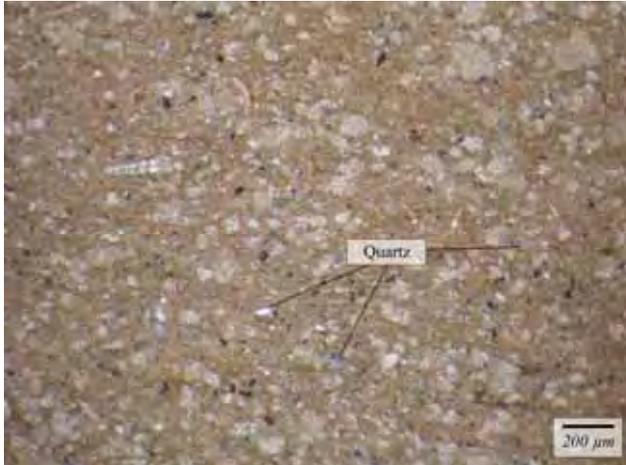


Photo 5.18 Grains de quartz dans la lame I36.



Photo 5.19 Forme benthique présente dans la lame I36.

I40 : Calcaire marneux contenant des microfossiles semblables à ceux contenu dans la lame **I36**. La présence de foraminifères benthiques (cf. **Photo 5.20** et **5.21**) et de quartz est toujours constatée.

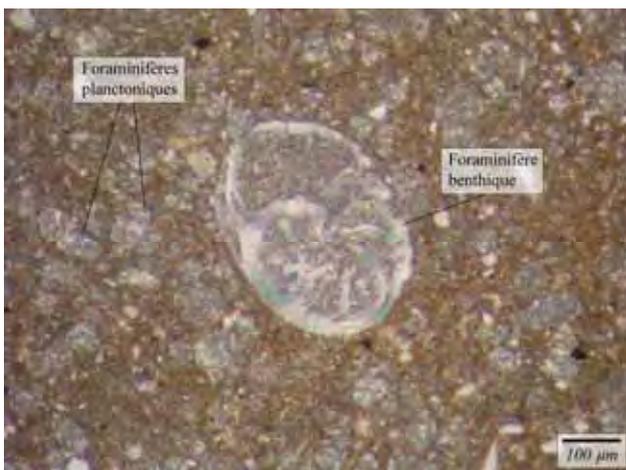


Photo 5.20 Agrandissement d'un foraminifère benthique dans la lame I40.

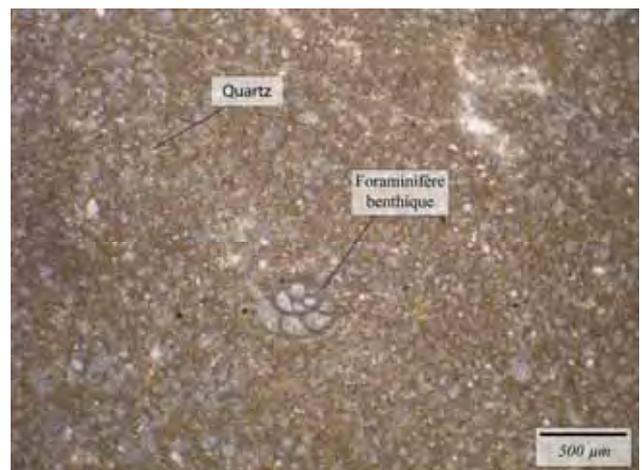


Photo 5.21 Foraminifère benthique dans la lame I40.

J45 : Passage des calcaires marneux de la Scaglia Rossa à la formation des marnes d'Erto. La matrice micritique est plus claire et à nouveau beige (cf. **Photo 5.22**). De petites formes globuleuses de foraminifères planctoniques sont présentes en grande quantité dans ce packstone (cf. **Photo 5.23**).

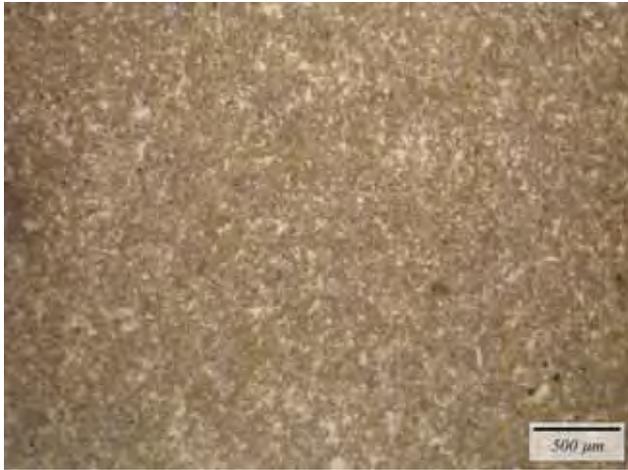


Photo 5.22 lame J45.

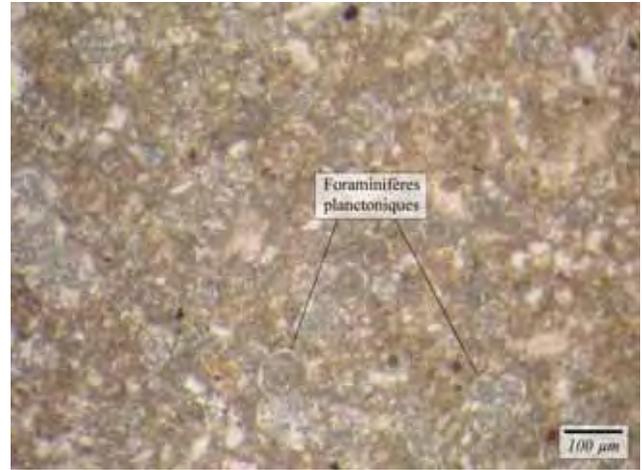


Photo 5.23 Agrandissement de la lame J45.

J75 : Cet échantillon marno-calcaire contient des foraminifères du même ordre de grandeur que dans l'échantillon précédent (**J45**). La présence de quartz en grande quantité est également observée, indiquant un apport détritique toujours plus important. La nature marneuse de l'échantillon a nécessité plusieurs essais avant la réalisation de cette lame mince (cf. **Photo 5.24** et **5.25**).



Photo 5.24 lame J75.



Photo 5.25 Agrandissement de la lame J75.

5.3 Discussions

Les microfaciès observés dans les roches de la Scaglia Rossa et des marnes d'Erto correspondent à des micrites riches en foraminifères planctoniques qui sont typiques d'une sédimentation pélagique en milieu marin ouvert très calme. La bonne conservation de ces microfossiles à tests calcifiés, ainsi que l'absence visible de dissolution, semble indiquer un dépôt bien au-dessus de la CCD (profondeur de compensation de la calcite). Cette profondeur varie selon la latitude et la nature de la circulation océanique. Une augmentation du niveau marin ou un refroidissement augmentant la solubilité de la calcite peut expliquer la variation de cette limite. Durant la transition Crétacé supérieur-Paléocène, celle-ci se situait approximativement à 3500m de profondeur, alors qu'aujourd'hui, la CCD se trouve à environ 5000m (Cojan et Renard, 1999).

L'absence de matière organique (cf. Chapitre 9 (Matière organique)), la présence de bioturbation (lame **Cr**) et d'organismes benthiques (lames **KT** et **I40**) démontre que l'oxygène se trouve en quantité suffisante sur les fonds océaniques pour la survie de ces espèces. Cependant, certaines formes pourraient avoir été remaniées, notamment dans la couche argileuse de la limite KT, qui montre des intraclastes boueux contenant des foraminifères maastrichtiens (cf. Chapitre 6 (Biostratigraphie)). L'absence d'éléments allochtones tels que spicules de spongiaires, fragments d'échinodermes ou autres débris d'organismes vivant sur ou en bordure de plateforme, indique une influence quasi inexistante de la plateforme du Frioul.

L'apparition de quartz dans les lames minces 1 mètre au-dessus de la limite KT (lames **I36** et **I40**) coïncide bien avec une augmentation de ce minéral calculée grâce aux analyses RX effectuées au chapitre 7 (Minéralogie) et indique une augmentation des apports détritiques qui se poursuit jusqu'à la lame **J75**, située au sommet de la coupe.

La présence de morceaux de carbonates diagénétiques dans la couche argileuse surmontant la limite KT semble indiquer des bouleversements dans ces sédiments lors de la diagenèse.

Avant la limite KT, les foraminifères planctoniques sont de tailles variables et plusieurs formes de taille importante et complexe sont observées. Au-dessus de cette transition, ceux de grandes tailles ont disparus et quelques organismes benthiques sont observés. Les espèces peu tolérantes vis-à-vis des changements environnementaux (stratégie K) ne paraissent donc pas résister aux conditions de stress de la limite KT. Cependant, quelques formes sont encore présentes quelques centimètres seulement sous la couche argileuse (lame **Cr**). Les espèces opportunistes (stratégie R), déjà présentes avant la limite Maastrichtien-Danien, semblent survivre à la crise environnementale de cette transition et prolifèrent dès les premiers centimètres de sédiments daniens. Une étude plus précise de la microfaune a été effectuée dans le chapitre suivant (Biostratigraphie).

CHAPITRE 6

BIOSTRATIGRAPHIE

6.1 Méthode

La détermination de la microfaune a été réalisée grâce à l'analyse de microfossiles sous forme dégagée et de lames minces. La première méthode consiste à dégager les foraminifères de leur matrice, afin de pouvoir les laver et ensuite les étudier. Le second procédé est l'observation des 11 lames minces utilisées pour décrire les microfaciès (cf. Chapitre 5 (Microfaciès)) à l'aide d'un microscope polarisant.

Plusieurs essais de lavages ont été réalisés à l'aide de différents produits (Calgon, H₂O₂, Deconnex, eau) à l'Université de Neuchâtel, mais sans succès. L'étude des formes dégagées a donc été basée sur des échantillons qui avaient été prélevés et étudiés dans cette même coupe de La Spesse par le Prof. Dr. Valeria Luciani de l'Université de Ferrara (Italie) lors d'une précédente étude biostratigraphique de la région. Les lavages avaient été effectués à l'aide de Desogen, un produit chimique tensio-actif de l'ancienne compagnie Ciba Geigy qui n'a pas pu être obtenu à Neuchâtel. Les résultats obtenus ont été utilisés pour déterminer la biozonation de la coupe.

Les photos des lames minces ont été effectuées à l'université de Neuchâtel et la détermination des formes présentes a été réalisée par le Dr Gerta Keller de l'université de Princeton (NJ, USA).

Pour plus de détails sur les lavages, voir l'annexe 2.1.

6.2 Foraminifères planctoniques

6.2.1 Evolution des foraminifères planctoniques

Les foraminifères planctoniques constituent d'excellents fossiles stratigraphiques pour définir la limite KT. Ils sont d'ailleurs utilisés comme critère pour décrire le GSSP de la limite KT à El Kef. Les assemblages observés dans les sédiments marno-calcaires de la coupe de La Spesse sont dominés par ce groupe de microfossiles. Les foraminifères peuvent être divisés en 2 groupes, selon les types de stratégies démographiques adaptatives décrites par Mac Arthur et Wilson en 1967 :

- Les espèces **R**, dites « opportunistes » ou « généralistes », sont petites, globuleuses, peu diversifiées et vivent au fond des océans. Elles ont un taux de reproduction élevé qui leur permet d'avoir de nombreux descendants et d'effectuer un « bloom » lors des variations du taux de nutriments. Elles sont tolérantes et bien adaptées aux fluctuations des conditions ambiantes, mais sont vulnérables à la compétition.

- Les espèces **K**, dites « d'équilibre » ou « spécialistes », sont de plus grande taille et ont des formes complexes. Leur développement est plus long et elles nécessitent une tranche d'eau plus profonde, ainsi qu'une bonne dispersion des nutriments. Elles sont peu tolérantes vis-à-vis des fluctuations du milieu, mais peu vulnérables une fois le milieu stabilisé.

Les espèces « K » sont synonymes de stabilité du milieu, alors que les espèces « R » règnent lors de périodes de stress. Lors de crises environnementales, les espèces complexes sont les premières à disparaître et lorsque le système retrouve son état d'équilibre, il y a prolifération d'espèces colonisatrices très opportunistes, propagation d'espèces tolérantes, puis diversification vers des formes plus évoluées qui envahissent les niches écologiques plus profondes (Keller et Pardo, 2004) (cf. **Fig 6.1**).

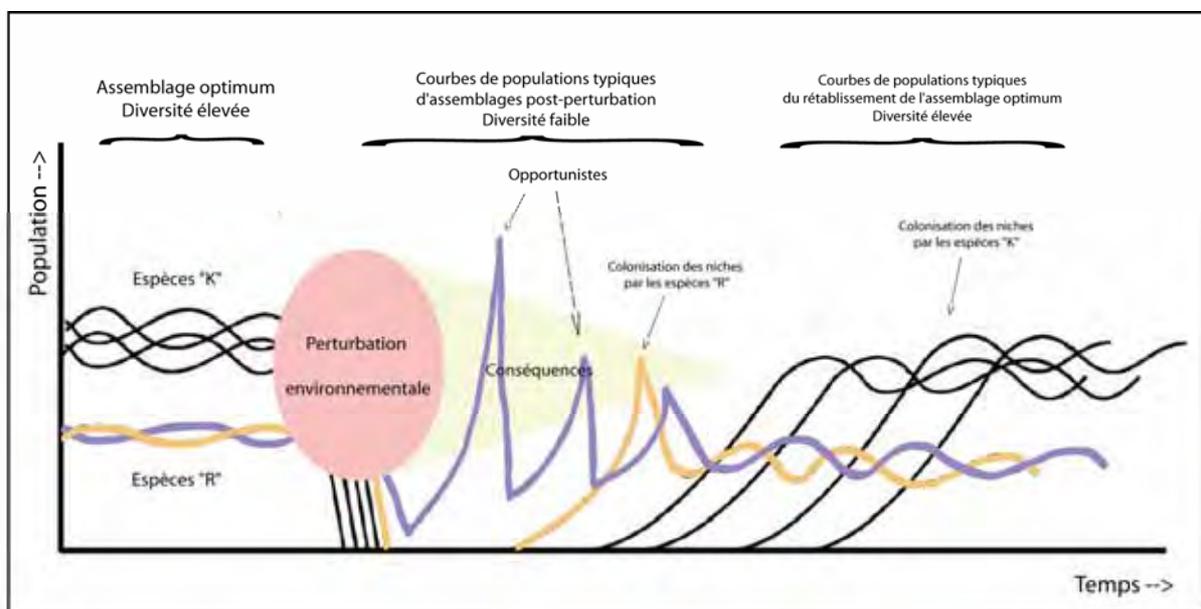


Fig 6.1 Modèle illustrant la succession écologique après une perturbation environnementale majeure. (modifié d'après Keller et Pardo, 2004)

6.2.2 Paléobathymétrie

Une évaluation de la distance de la côte et de la paléobathymétrie générale de l'environnement de sédimentation est possible grâce au calcul du rapport planctonique/benthonique (P/B) (Murray, 1976, 1991). Dans la section étudiée à Erto, les foraminifères planctoniques représentent plus de 90% de ces protozoaires avec un rapport P/B correspondant de 10 ou >10 (les calculs ont été effectués à partir d'environ 300 spécimens). Un léger déclin de la population de foraminifères planctoniques est observé aux alentours de la limite KT avec un minimum du rapport P/B (8,5) juste au-dessus de la couche argileuse. Ces valeurs indiquent que les sédiments constituant la coupe de La Spesse ont été déposés dans un bassin assez profond, avec des paléop profondeurs aussi importantes que celles caractérisant l'environnement mésobathyal (400 à 1500m) et bathyal inférieur (1500 à 3000m) (Luciani, 1997).

6.2.3 Biozonation

En se basant sur la répartition des foraminifères planctoniques, six biozones et sous-zones ont été déterminées dans la coupe de La Spesse par V. Luciani en 1997 (cf. **Fig 6.2**).

La zone à *Abathomphalus mayaroensis* et celle à *Pseudotextularia deformis* se situent à la fin du Maastrichtien et correspondent aux zones de foraminifère planctonique CF1, CF2 et CF3 définies par Keller *et al.* en 1995. La zone à *Guembelitra cretacea* correspond à P0 et se situe tout au début du Tertiaire et enfin les zones à *Parvularugoglobigerina eugubina*, à *Eoglobigerina eobulloides* et à *Parasubbotina pseudobulloides* sont définies dans le Danien inférieur (P1a, P1b) (Luciani, 1997). Grâce aux différentes limites entre les biozones, une datation relative de la coupe de La Spesse peut être effectuée. L'âge utilisé par Keller *et al.* (1995) pour la limite KT (65,0 ma) a été révisé par la commission internationale de stratigraphie (ICS) en 2004 et toutes les limites de zones ont été augmentées de 0,5 ma, n'affectant ainsi pas les intervalles.

		Événements (datum events)	Luciani à Erto, 1997	Keller et al. à El kef, 1995		
Danien inférieur		└ P. eugubina	<i>Parasubbotina pseudobulloides</i>	65,2 ma	P1b	
		└ P. pseudobulloides		P1a(2)	P1a	
			<i>Eoglobigerina eobulloides</i>	P1a(1)		
		└ P. eugubina	<i>Parvularugoglobigerina eugubina</i>		65,47 ma	
Maastrichtien terminal		└ G. conusa └ P. hantkeninoides	<i>Guembelitra cretacea</i>	65,5 ma	P0	
		└ A. mayaroensis	<i>Pseudotextularia deformis</i>	65,8 ma	CF1	
		└ P. hantkeninoides	<i>Abathomphalus mayaroensis</i>	<i>Pseudoguembelina palpebra</i>	65,95 ma	CF2
		└ G. gansseri		<i>Pseudoguembelina hariaensis</i>		CF3

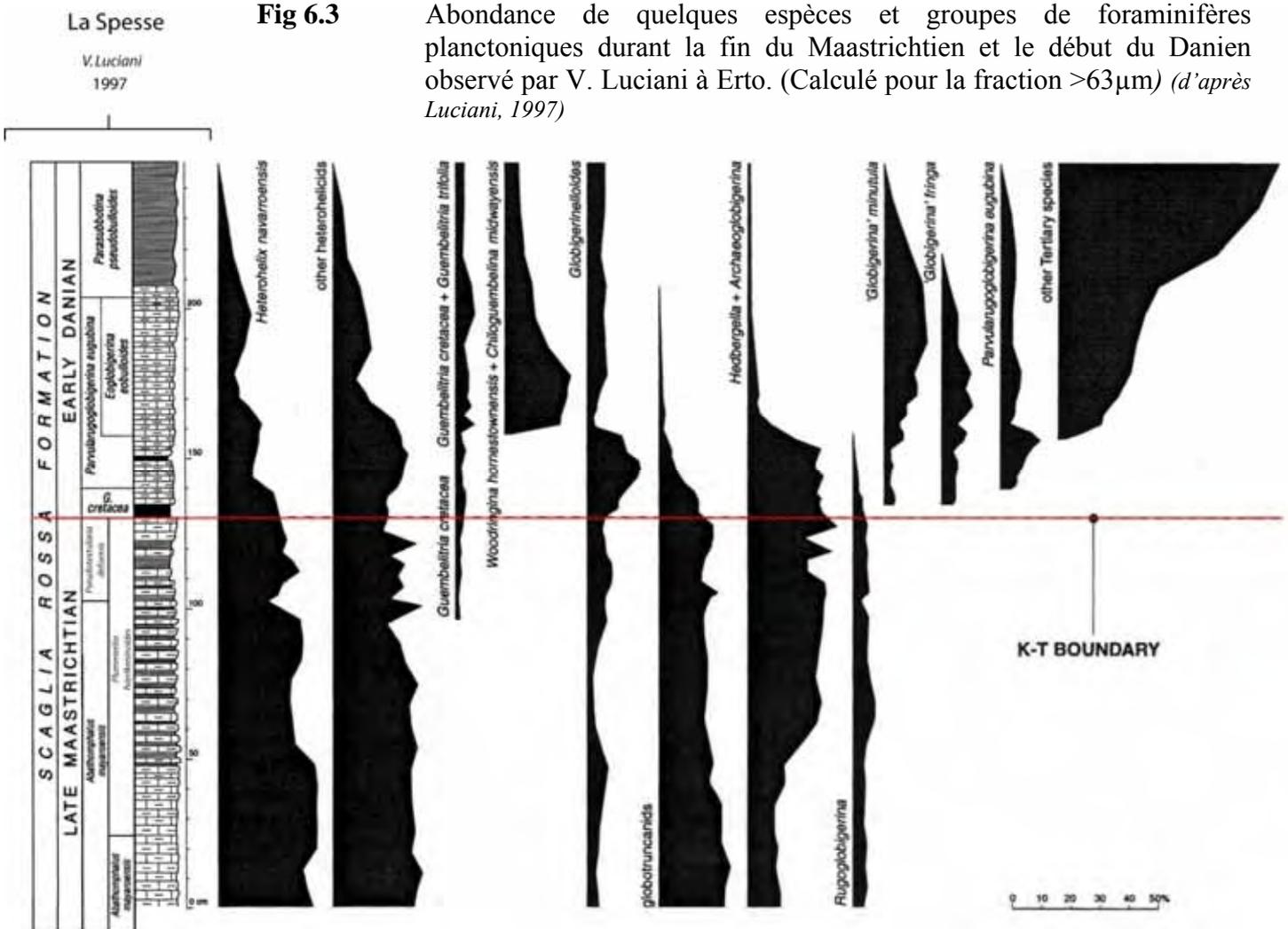
Fig 6.2 Tableau montrant les zones à foraminifères planctoniques du Maastrichtien terminal au Danien inférieur à El Kef comparées aux biozones de la section de La Spesse étudié en 1997. (modifié d'après Luciani, 1997 et Keller *et al.*, 1995, âges corrigés d'après Gradstein *et al.*, 2004)

Les sections contenant la limite KT dans les Alpes du sud montrent parfois de nombreux hiatus (Luciani, 1989). L'analyse des foraminifères planctoniques à Erto indique que la coupe est relativement complète, mais des indices de lacunes ont été observés dans les lames minces, notamment dans les premiers centimètres des sédiments daniens.

La base de la coupe est composée de la zone à *Abathomphalus mayaroensis*. Le début de la zone intervallée à *Pseudotextularia deformis*, définie par la disparition de *A. mayaroensis*, est située 27 cm sous la couche argileuse de la limite KT. Certains auteurs (Keller *et al.*, 1995, Molina *et al.*, 1996) ont introduits la zone à *Plummerita hantkeninoides* pour situer la fin de la zone à *A. mayaroensis* (cf. **Fig 6.2**). En effet, la disparition de *A. mayaroensis* est un événement local et l'apparition de *P. hantkeninoides* a une application plus large que l'intervalle à *P. deformis*. A Erto, cette limite se situe à plus d'un mètre sous la limite KT. La principale extinction d'espèces Crétacé se produit juste sous la couche argileuse foncée ; la limite KT est censée correspondre à ce niveau. La zone à *Guembelitra cretacea* correspond à P0 et débute à la limite KT jusqu'à l'apparition des premières espèces tertiaires *Parvularugoglobigerina eugubina* et/ou *P. longiapertura*. (cf. **Fig 6.3**) L'arrivée de *Eoglobigerina eobulloides* définit le début d'une sous zone. Enfin, la dernière zone ayant été déterminée par Luciani est la zone à *Parasubbotina pseudobulloides* et correspond à l'apparition de l'espèce du même nom (Luciani, 1997).

Fig 6.3

Abondance de quelques espèces et groupes de foraminifères planctoniques durant la fin du Maastrichtien et le début du Danien observé par V. Luciani à Erto. (Calculé pour la fraction >63µm) (*d'après Luciani, 1997*)



6.3 Lames minces

Maastrichtien:

Un assemblage typique maastrichtien est observé dans les échantillons F18 et F28 qui sont tous deux situés plusieurs centimètres sous la limite KT :

R. rugosa, *H. globulosa*, *G. aspera*, *R. macrocephala*, *Guembelitra cretacea*, *Rosita contusa*, *P. hariaensis*, *Hedbergella sp.*, *Globotruncana arca*, *G. insignis*, *G. stuarti*.

Les espèces qui sont assez nettes ont été illustrées. Pour les espèces plus petites, les photos n'ont pas une assez bonne résolution (cf. **Planche II**)

La lame Cr, qui regroupe les échantillons F6 et F7, est composée d'un assortiment de petits foraminifères communs et d'une couche plus grossière bioturbée indiquant probablement un hiatus.

Toutes les photos montrent des faunes de la fin du Maastrichtien, probablement de la zone CF1 (malheureusement, aucun bon *hantkeninoides* n'a été trouvé) ou CF2 (cf. **Planche III**).

Limite KT :

La lame KT a été réalisée après induration d'une couche contenant les échantillons F3, F2, F1 (couche argileuse) et H1 (Danien). Les sédiments de la lame KT situés immédiatement au-dessus de la couche argileuse montrent un assemblage faunique se situant dans une partie supérieure de la zone P1a (cf. **Planche I**). De plus, la couche argileuse contenue dans cette lame ne renferme aucun foraminifère et le haut de la zone P0, qui est généralement située au-dessus de la couche argileuse riche en iridium, semble absent. Cet intervalle ressemble donc à une surface d'érosion contenant des intraclastes boueux datés du Crétacé. En effet, des fragments de mudstone situés dans la couche argileuse de la limite KT, possèdent des faunes maastrichtiennes (cf. **Fig 6.4**) et sont sans doute le résultat d'un processus tectonique lors de l'orogénèse alpine. De plus, des morceaux de carbonates sont observés dans la couche argileuse, probablement d'une origine diagénétique (cf. Chapitre 5 (Microfaciès)).

Danien :

Les échantillons I36 et I40, situés plus d'un mètre au-dessus de la limite KT, montrent un assemblage typique danien :

S. triloculinoides, *P. pseudobulloides*, *Woodringina hornerstownensis*, *Guembelitra cretacea*, *Globoconusa daubjergensis*, *Globigerina pentagona*.

Les spécimens sont trop petits pour être illustrés. L'échantillon I36 possède quelques rares *P. eugubina* dans cet assemblage contenant d'abondantes espèces daniennes. Cet échantillon est proche du haut de la zone P1a. L'espèce maastrichtienne *Globotruncids* est aussi présente dans l'échantillon I36 et semble donc être une forme remaniée du Crétacé. Les photos ne sont pas assez claires pour illustrer les espèces daniennes. La plupart des illustrations représentent des formes exotiques et benthiques qui sont de plus grande taille (cf. **Photo 5.19, 5.20, 5.21** Chapitre 5 (Microfaciès)).

L'échantillon J45, qui est situé à plus de 2 mètres au-dessus de la limite KT, fait partie de la formation des marnes d'Erto et se place probablement dans la zone P1b ou c. *S. triloculinoides*, *G. daubjergensis* et *P. pseudobulloides* sont observées.

L'échantillon J75 a été échantillonné au sommet de la coupe (à environ dix mètres dans le Danien) et se situe probablement dans la zone P3 ou P4. *Acarinina*, *Morozovella* et *Subbotina velascoensis* sont présentes.

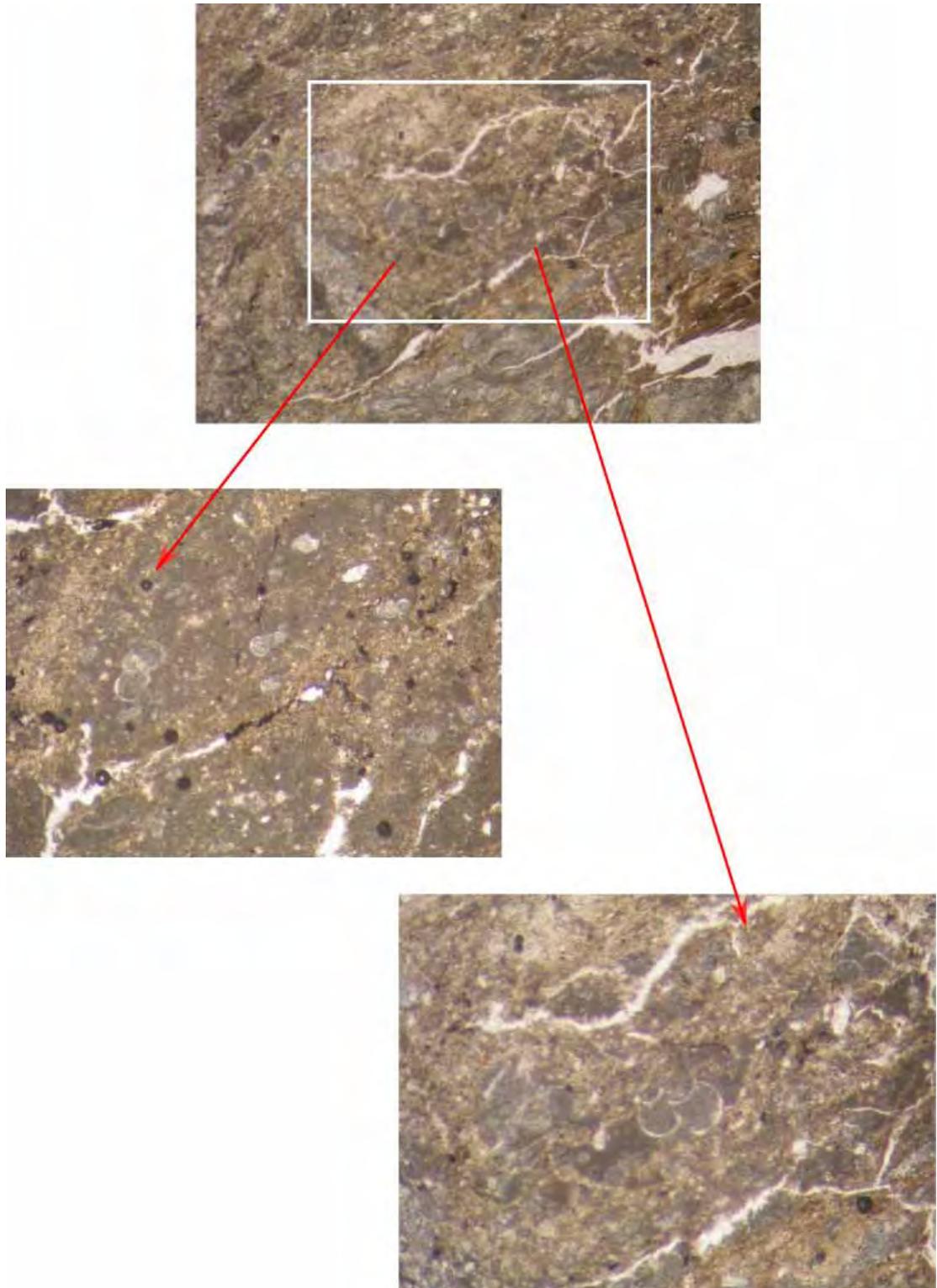


Fig 6.4 Intraclastes boueux situés dans la couche argileuse de la limite Crétacé-Tertiaire contenant des formes maastrichtiennes.

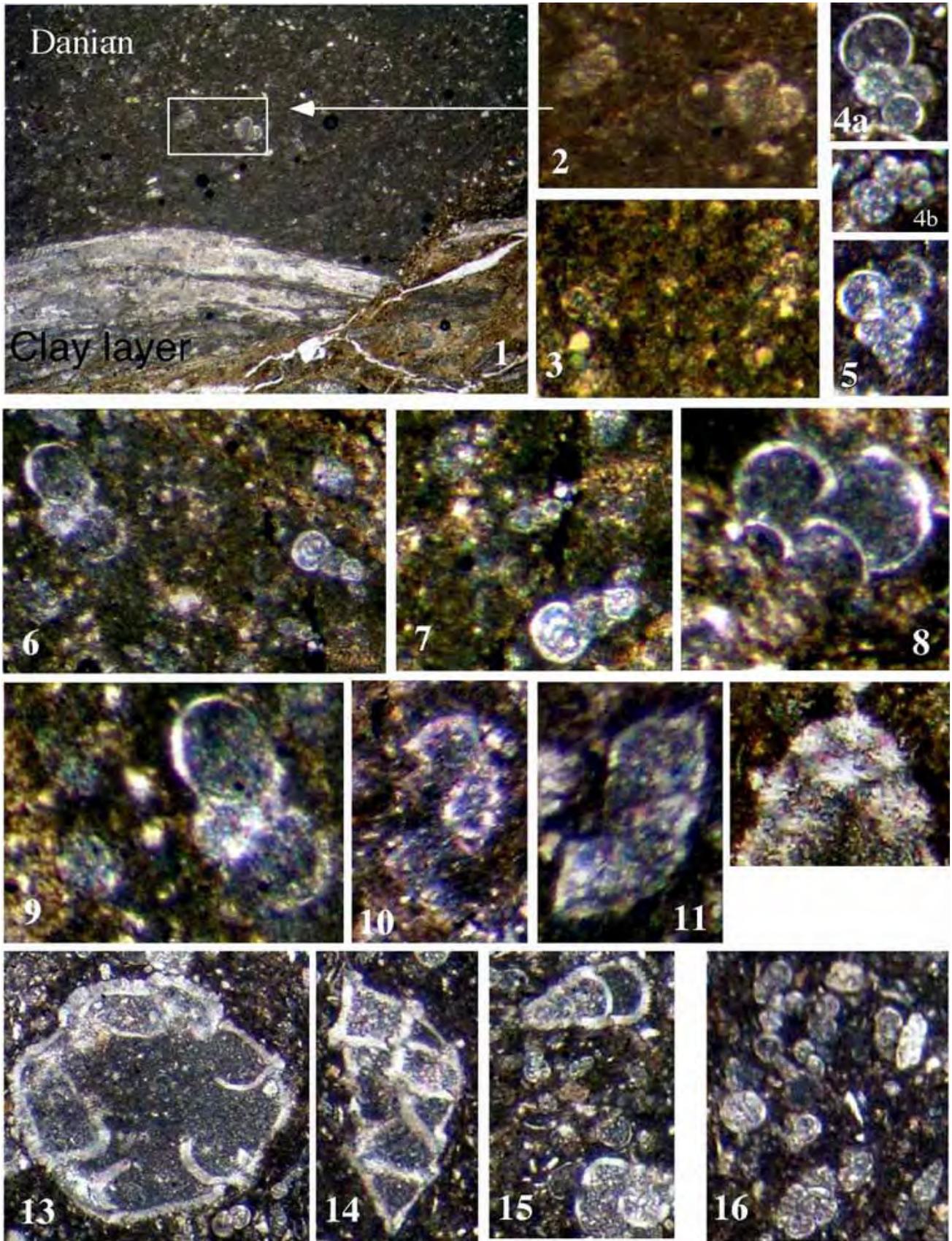


Planche I : Lame de la limite KT

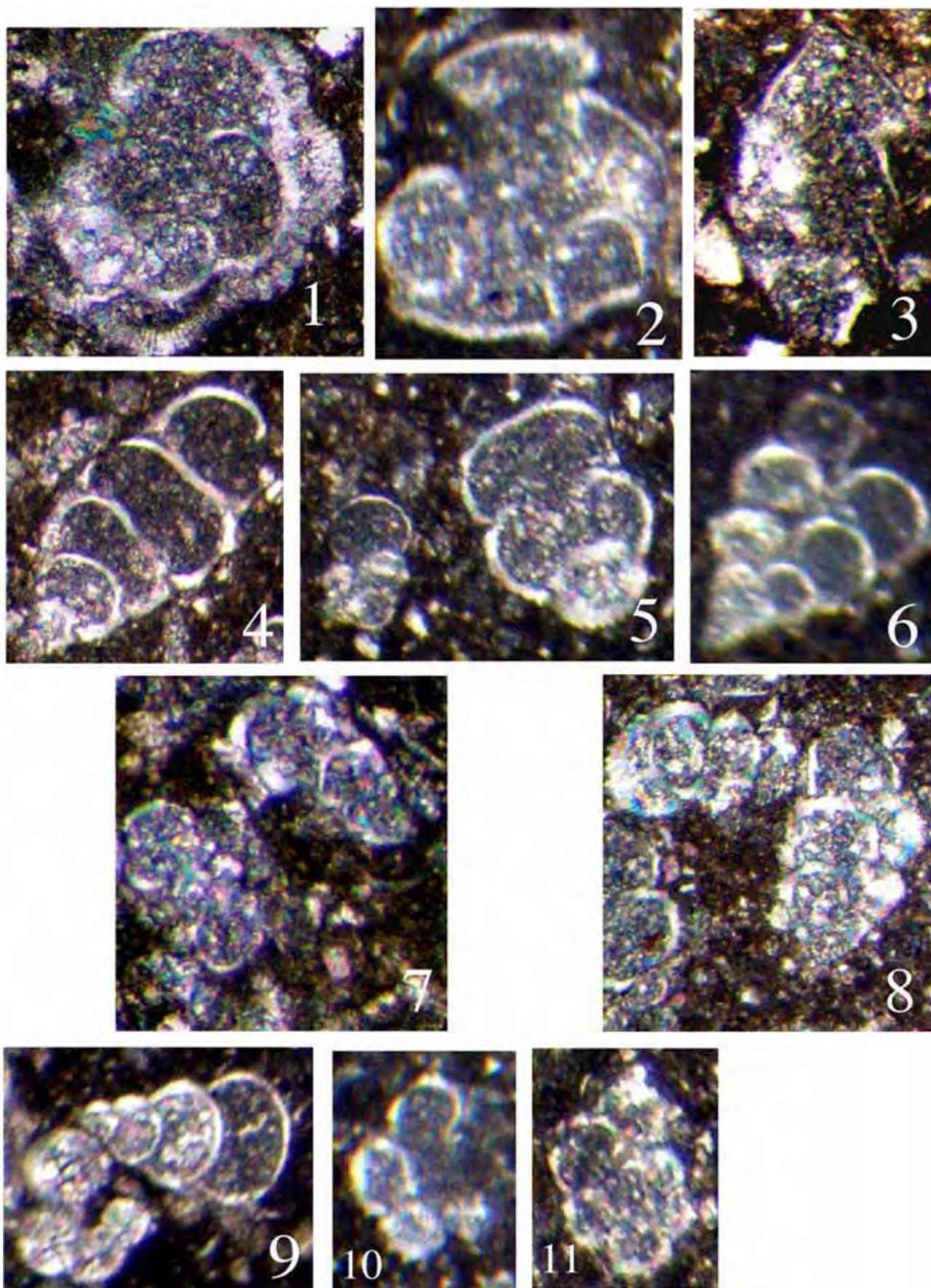


Planche II : Lames des échantillons F (18, 28) et G (35, 42)

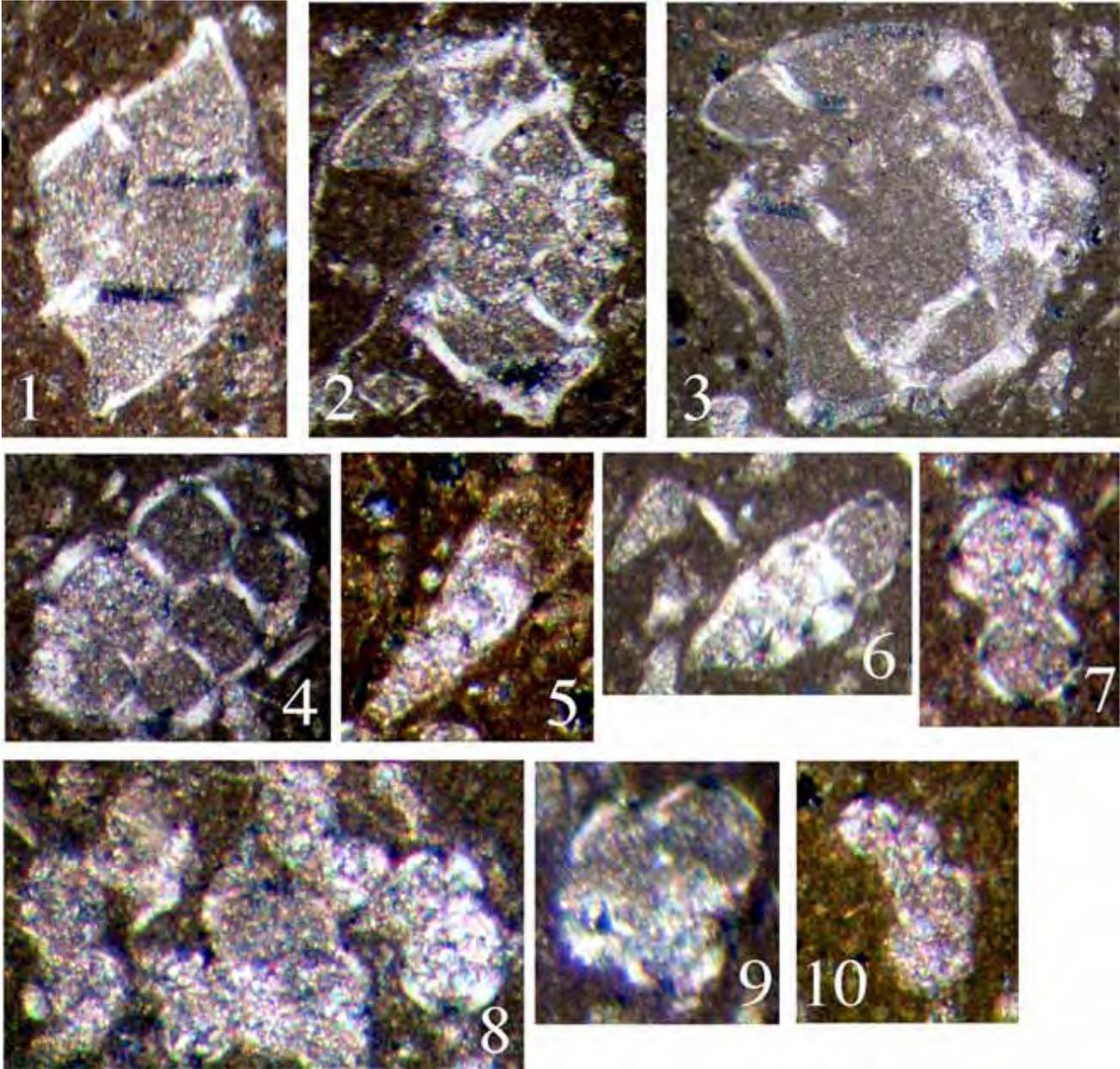


Planche III : Lame Cr

Planche I : Limite KT

1. Couche argileuse de la limite KT en contact avec des sédiments daniens (H1) montrant un assemblage riche, typique de la zone P1a, qui renferme *Globoconusa daubjergensis*, *G. extensa*, et *Parvularugoglobigerina eugubina*.
2. Agrandissement de *P. eugubina* et *G. daubjergensis* au-dessus du contact avec la limite KT.
3. Beaucoup d'espèces daniennes, dont *P. eugubina*, situé au-dessus du contact de la limite KT.
- 4-5. 4a. *Rugoglobigerina macrocephala*, 4b. *Globigerinoides aspera*
5. *Heterohelix globulosa* du Danién inférieur.
- 6-8. Foraminifères du Maastrichtien terminal contenu dans les intraclastes boueux de la limite KT : *Rugoglobigerina rugosa*, *Hedbergella sp.* (6, 7), *Heterohelix globulosa* (8)
9. Agrandissement (6x) montrant probablement *P. eugubina* sur la gauche, ce qui suggère un mélange de sédiments daniens et maastrichtiens à la limite KT.
- 10-12. Intraclastes boueux dans la couche argileuse de la limite KT contenant des espèces maastrichtiennes communes, dont *Globotruncanids* (*G. arca* ? (10, 12), *G. stuarti* (11)).
- 13-16. Assemblage du Maastrichtien terminal 5 cm sous la couche argileuse de la limite KT (F10) : *Rosita contusa* (13, 14), *Rugoglobigerina sp.*, *Pseudotextularia deformis* (15) et un assemblage d'espèces de petites tailles *Hedbergellids*, *Globigerinellids* et *Heterohelicids* (16) sont présents.

Planche II : Echantillons F et G

1. *Globotruncana insignis or rosetta.* (F 18)
2. *Rosita contusa*, (F 28)
3. *Globotruncana arca* (F28)
4. *Pseudotextularia deformis* (F 28)
5. *P. deformis apertural view*, *Rugoglobigerina macrocephala* (F 28)
6. *Heterohelix globulosa* (G 35)
7. *H. globulosa*, *R. rugosa*, *R. macrocephala* (G 35)
8. *H. globulosa*, *R. rugosa*, *R. macrocephala* (G 42)
9. *H. globulosa*, *R. rugosa*, (G 42)
10. *R. rugosa* (G42)

Planche III : Lame Cr

- 1,2. *Globotruncanita stuarti*
3. *Rosita contusa*
4. *Pseudoguembelina hariaensis*
5. *Heterohelix globulosa*
6. *Heterohelix globulosa* and *H. navarroensis*
7. *Apertural view of H. globulosa*
8. *Assemblage of Rugoglobigerin rugosa*, *R. macrocephala*,
- 9&10. *R. rugosa*

6.5 Discussions

Il existe une controverse au sujet du changement abrupte ou graduel de la faune des foraminifères planctoniques à travers la limite KT. Quelques espèces crétacées trouvées dans des couches paléocènes sont interprétées comme survivantes (ex : *Guembelitra cretacea*). Elles sont simples, petites et ont une stratégie adaptative d'opportunistes (stratégie R) qui est la stratégie la mieux adaptée à des conditions de stress environnemental. D'autres espèces trouvées dans des couches Paléocènes sont considérées comme remaniées car elles ont des formes complexes et une stratégie adaptative d'équilibre (stratégie K) (ex : *Globotruncids*) qui ne permet pas de survivre à une crise environnementale telle que celle survenue à la limite KT (Luciani, 1997).

Dans les lames minces observées dans cette étude, certains genres de foraminifères présents dans les derniers centimètres du Maastrichtien sont déjà des formes opportunistes stress tolérantes (ex : *Guembelitra* et *Heterohelix*) (Keller *et al.*, 2002). *Guembelitra* survit à la limite KT. Ces généralistes sont rares dans les environnements ouverts au Maastrichtien et deviennent plus ubiquistes au Danien. Bien que le genre *Heterohelix* survive également à la crise de la fin du Crétacé, sa taille est moins importante au dessus de la limite KT (Adatte, comm. pers.).

A Erto, la base du Danien contient d'abondantes espèces crétacées qui masquent le bloom des opportunistes. En effet, le genre *Heterohelix* diminue graduellement durant le Danien (P1a) (cf. **Fig 6.3**), alors que dans des coupes situées à Agost (Espagne) ou El Kef (Tunisie), ils passent de 50% à moins de 10% à la base du Danien (Keller et Pardo, 2004). Une abondance inhabituelle de généralistes du Crétacé peut être le résultat d'un remaniement, mais est ici sans doute due à la survie de ce genre. Bien qu'il n'y ait encore aucun accord sur le nombre exact, environ 15 espèces sont considérées comme survivantes à la limite KT : *Globotruncanella subcarinatus*, *Globigerinelloides aspera*, *Heterohelix globulosa*, *Heterohelix complanata* (= *Heterohelix lamellosa*), *Heterohelix navarroensis*, *Heterohelix dentata*, *Heterohelix planata*, *Hedbergella monmouthensis*, *Hedbergella holmdelensis*, *Pseudoguembelina costulata*, *Pseudoguembelina kempensis*, *Guembelitra cretacea*, *Guembelitra trifolia*, *Guembelitra danica*, *Guembelitra irregularis* (Keller *et al.*, 2002). De plus, certaines analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$), pratiquées sur les tests d'espèces crétacées se poursuivant à la base du Danien, donnent un signal « tertiaire » (valeurs inférieures à celles du Crétacé) (Keller, 1994), excluant donc un remaniement de ces espèces.

Le sommet de la zone P0 observée dans les lames minces est absent et indique un hiatus ou une zone d'érosion. De plus, les premiers sédiments au-dessus de P0 montrent un assemblage faunique se situant dans une partie déjà supérieure de la zone danienne P1a. Une baisse du niveau marin est connue à cette époque (Hallam 1989, Hallam et Wignall 1999) et a été étudié en Tunisie notamment (Adatte *et al.*, 2002).

L'extinction graduelle des foraminifères planctoniques, ainsi qu'une sélectivité d'extinction selon l'architecture du test semble décrire la plupart des sections contenant la transition Crétacé-Tertiaire, démontrant la grande complexité de cette crise qui est difficilement conciliable avec l'hypothèse d'une seule cause brutale et globale (Lethiers, 1998). En effet, les événements survenus avant la limite KT (refroidissement, volcanisme, impact) se traduisent par l'apparition de formes plus généralistes au détriment des formes spécialisées, avant le coup de grâce d'un nouvel impact et d'une transgression généralisée à 65,5 ma.

6.6 Taux d'accumulation

En corrélant la section de la présente étude (agrandissement de la coupe autour de la limite KT) et la section selon Luciani (1997), les différentes biozones peuvent être ajustées et une datation relative est possible à l'aide des âges obtenus par Keller *et al.* (1995) (cf. **Fig 6.5**).

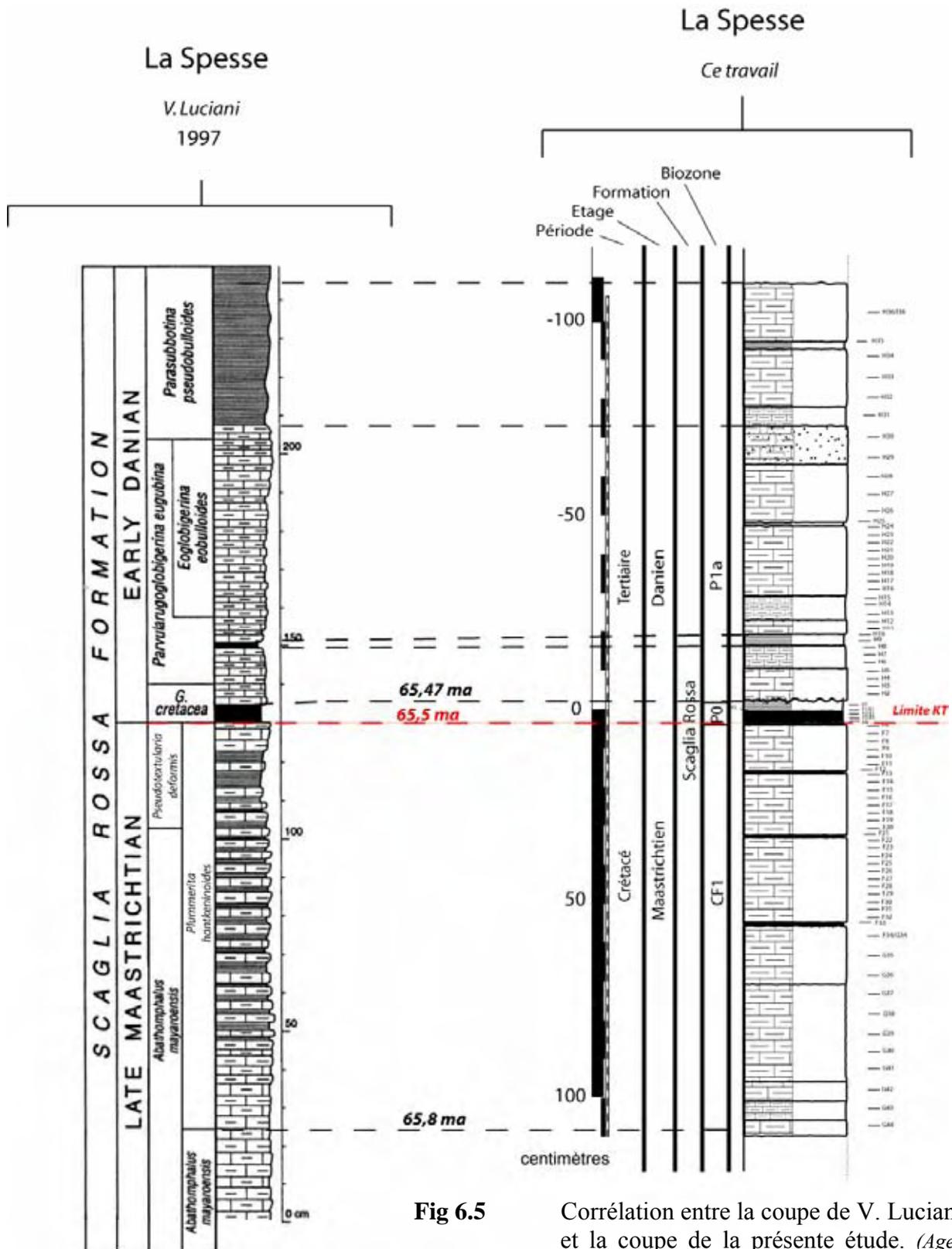


Fig 6.5

Corrélation entre la coupe de V. Luciani et la coupe de la présente étude. (Ages modifiés d'après Keller *et al.*, 1995)

Des taux d'accumulation peuvent être obtenus pour les différentes zones datées ainsi que pour l'ensemble de la coupe en utilisant les trois âges définis le long de celle-ci. Pour la première zone (zone A) délimitée par des âges (G44 à F6), un taux d'accumulation de 0,35 cm/ka est obtenu. Cette vitesse diminue en étudiant la couche argileuse à la limite (Zone B) délimitée par F6 et H1 (0,20 cm/ka). Le taux d'accumulation moyen pour tout l'intervalle délimité par les datations est de 0,33 cm/ka. Une estimation de l'âge relatif du sommet de la coupe KT (H36) est donc possible en connaissant l'épaisseur jusqu'au haut de la section. Cet échantillon est ainsi daté à 65,14 Ma (cf. **Table 6.6**). En imposant un taux d'accumulation semblable avant et après la limite KT (0,35 cm/ka), l'âge obtenu pour l'échantillon H36 serait de 65,16 Ma.

Echantillons	Age (Ma)	Intervalle (ka)	Epaisseur (cm)	Taux d'accumulation (cm/ka)
G44	65.8	-	-	0.35
Zone A	-	300	104	0.35
F6	65.5	-	-	0.28
Zone B	-	30	6	0.20
H1	65.47	-	-	0.27
Zone C	-	327	108	0.33
H36	65.14	-	-	0.33

Table 6.6 Calcul du taux d'accumulation dans l'agrandissement KT de la section de la Spesse.

Cependant, les estimations des vitesses d'accumulation et de l'âge du haut de la coupe reposent uniquement sur trois dates et deux zones, dont une de 6 cm d'épaisseur seulement (cf. **Fig 6.7**). Ces résultats sont donc uniquement des approximations et ne constituent donc pas des données très précises. Cependant, la nature condensée de la couche argileuse P0 semble certaine.

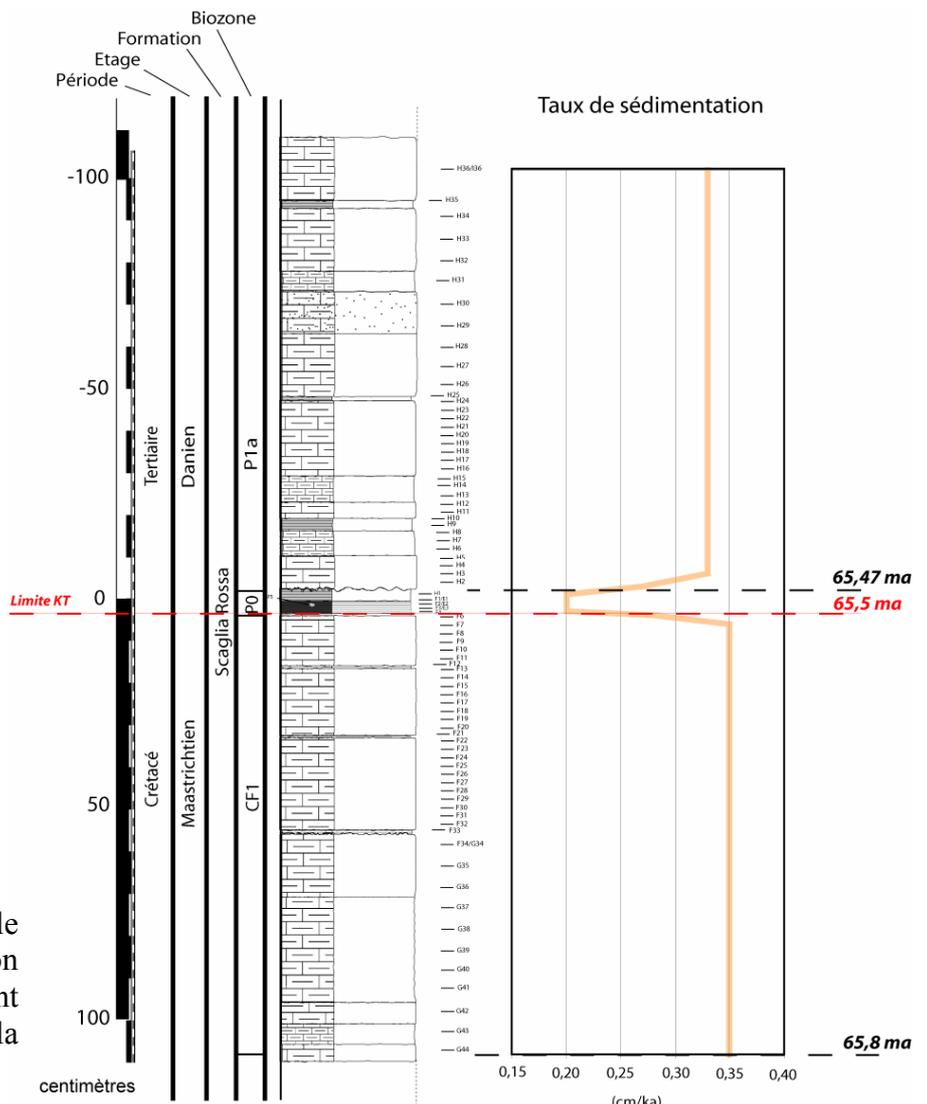


Fig 6.7 Graphique montrant le taux de sédimentation dans l'agrandissement KT de la section de la Spesse.

CHAPITRE 7

MINÉRALOGIE

7.1 Méthode

Les analyses minéralogiques ont été effectuées durant les mois d'avril et d'octobre 2005 au laboratoire d'analyse environnementale et géochimique (GEA) de l'université de Neuchâtel au moyen du diffractomètre « SCINTAG XDS 2000 ».

Les plans atomiques d'une phase minérale sont irradiés par des rayons X selon un angle et une direction donnés et émettent un rayonnement dont la longueur d'onde est similaire à celle du rayonnement primaire. Des photoélectrons sont diffractés dans toutes les directions et selon la loi de Bragg seul un angle particulier permet une interférence constructive entre les rayonnements réfléchis par les plans successifs.

Cet angle (θ) est fonction de la distance entre les plans atomiques (distance réticulaire (d)), ainsi que de la longueur d'onde des rayons X (λ). Les atomes d'un même plan diffractent dans des conditions de Bragg identiques ; les ondes émises alors par les atomes observent un même angle d'interférence constructive qui correspond à un pic d'intensité, exprimé en coup par seconde (cps), sur le diffractogramme.

La différence de marche (δ) entre deux rayons réfléchis par deux plans consécutifs est :

$$\delta = OH + O'H' = 2d \sin\theta$$

Les deux rayons sont en phase si $\delta = n\lambda$

$$\rightarrow \text{Loi de Bragg : } n\lambda = 2d \sin\theta$$

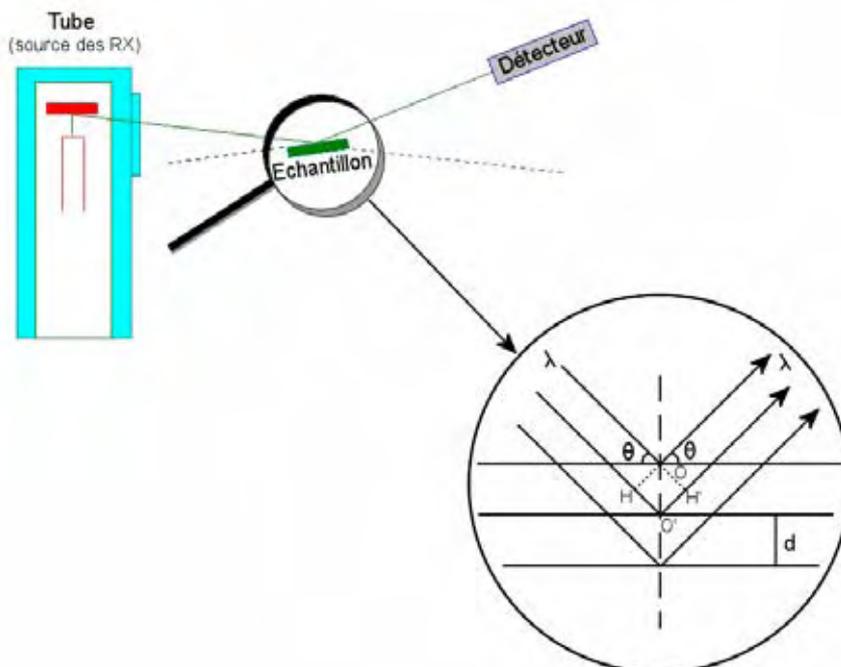


Fig 7.1 Schéma illustrant le diffractomètre et la réflexion des rayons X. (modifié d'après Bouchet, Meunier et Sardini, 2000)

En mesurant les angles θ de réflexion du rayonnement incident, il est possible de déterminer les distances réticulaires d d'un réseau cristallin caractéristique d'un minéral donné. Le principe est basé sur le fait que, dans un assemblage minéralogique, les intensités des pics principaux reflètent les proportions de chaque composant de l'assemblage.

Des poudres désorientées du matériel brut (roche totale) ainsi que des coulages orientés des fractions fines (argiles) ont été analysés afin de déterminer les différentes concentrations des minéraux présents.

7.1.1 Préparation de la roche totale

Les échantillons sont grossièrement concassés, puis une fine poudre est obtenue après un passage de l'échantillon dans une broyeuse à agate. Cette poudre est ensuite passée sous presse afin d'obtenir une fine lentille de 15 mm de diamètre contenant donc la roche non orientée. Cette préparation peut ensuite être soumise aux rayonnements X.

7.1.2 Préparation des argiles

Les argiles ont été traitées selon le mode opératoire établi par Kübler (1983). Ce processus a pour but de séparer les fractions fines ($<16\mu\text{m}$) de la masse de l'échantillon.

L'échantillon est broyé grossièrement, puis on procède à sa décarbonatation grâce à l'adjonction d'acide chlorhydrique (HCl 10%). En effet, comme le CaCO_3 a un coefficient d'absorption massique très élevé, il absorbe une partie de l'énergie des rayons X et son pic dissimule celui des autres minéraux. La solution obtenue est centrifugée et lavée plusieurs fois avec de l'eau désionisée, jusqu'à ce que la suspension obtenue ait un pH neutre (7-8). La fraction $<2\mu\text{m}$ est ensuite séparée par centrifugation, alors que la fraction comprise entre 2-16 μm est séparée par gravitation normale. Les différents temps de centrifugation et de gravitation ont été calculés à partir de la loi de Stokes :

$$v = 2 / 9 \cdot [(D_1 - D_2) \cdot g \cdot r^2] / \mu$$

v : vitesse de chute de la particule

D1 : masse volumique de la particule

D2 : masse volumique du fluide

g : accélération de la pesanteur

r : rayon de la particule

μ : viscosité du fluide

Les fractions fines sont coulées sur des verres de montre de 25mm de diamètre et séchées à température ambiante, de façon à obtenir des préparations orientées.

Les échantillons sont alors passés sous rayons X de la même manière que lors de l'analyse roche totale. La fraction $<2\mu\text{m}$ est passée une seconde fois sous rayonnements X après avoir été traitée à l'éthylène-glycol, de façon à identifier les couches gonflantes.

Pour plus de détails sur ces manipulations, voir l'annexe 2.2.

7.2 Minéralogie de la roche totale

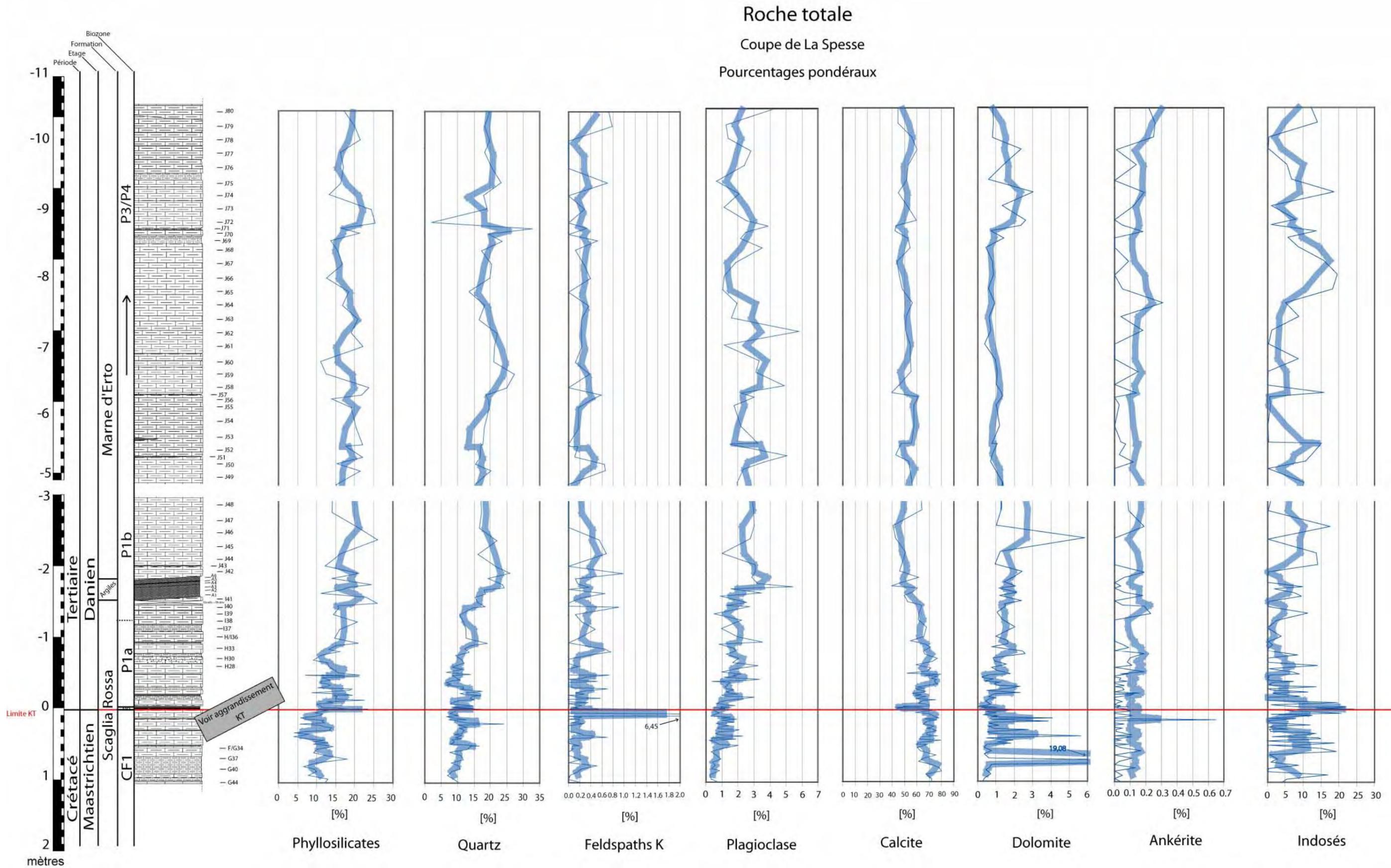
La détermination des composants de la roche totale a été effectuée sur les 134 échantillons (J80 à G44) prélevés dans la section de La Spesse. Les données obtenues en CPS sont imprimées sous forme de graphiques et de listings. Plusieurs standards sont ensuite utilisés afin de déterminer la composition de la roche totale. L'abondance des minéraux dans chaque échantillon est exprimée en pourcentage pondéraux (% wt). Les observations seront discutées à une échelle globale (G44 à J80), puis focalisée sur les échantillons proche de la limite KT (F34 à H25), excepté la couche argileuse (H1 à F4) qui sera traitée séparément. Une moyenne mobile sur 3 valeurs a été calculée, afin de montrer les tendances principales de ces courbes.

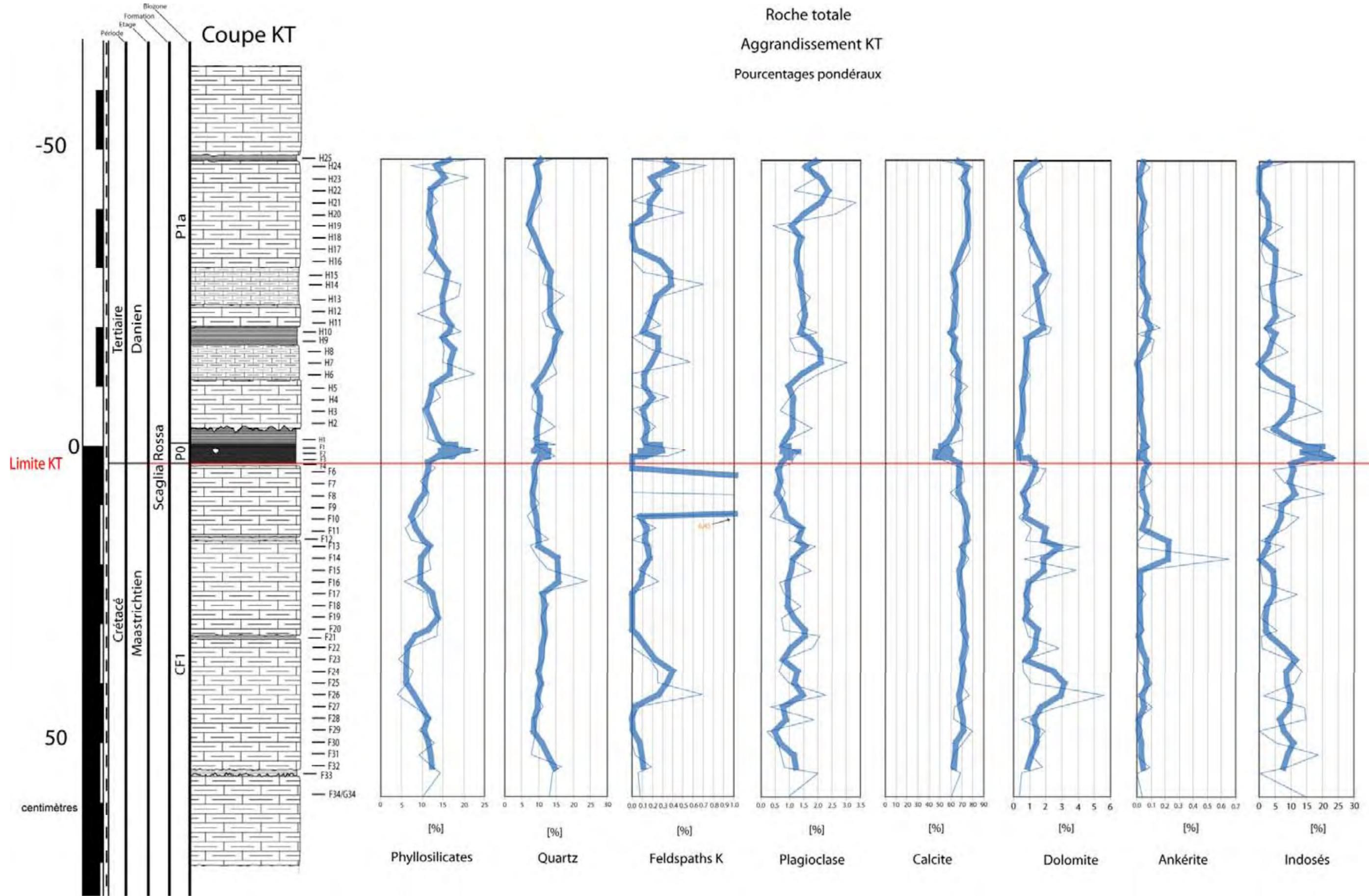
7.2.1 Résultats

Minéraux présents

- Calcite :** La calcite est le principal minéral observé en roche totale. La teneur varie entre 40% et 80% tout au long de la coupe, alors qu'autour de la limite KT, celle-ci varie entre 52% et 79%, excepté les échantillons de la couche argileuse de la limite KT (H1 à F4) montrant des valeurs allant de 42% à 70% seulement (52% en moyenne). Le pourcentage moyen des teneurs en calcite est un peu plus élevé pour les échantillons proches de la limite (67%) par rapport à la coupe dans son ensemble (63%).
- Phyllosilicates :** Les phyllosilicates montrent des teneurs variant entre 4% et 26% le long de la coupe et entre 4% et 23% à la limite KT. On remarque une teneur plus élevée pour les échantillons situés au-dessus de la limite KT (Danien). La couche argileuse montre des teneurs allant de 11% à 23% (17% de moyenne). Le pourcentage moyen des teneurs en phyllosilicates est plus faible vers la limite (12%) que tout au long de la coupe (15%).
- Quartz :** La teneur de quartz varie entre 2% et 33% pour l'ensemble de la coupe, alors que pour la limite, elle varie entre 7% et 24%. Les échantillons de la couche argileuse à la limite (H1 à F4) ont des teneurs variant de 9% à 15% (12% de moyenne). Le pourcentage moyen des teneurs en quartz est plus faible vers la limite (11%) que tout au long de la coupe (14%).
- Indosés :** A l'échelle globale ainsi qu'autour de la limite KT, la quantité des minéraux indosés (matière organique et opale CT) varie de 0% à 20%. Les teneurs varient entre 13% et 24% pour la couche argileuse (18% de moyenne). Le pourcentage moyen des teneurs en minéraux indosés est semblable pour les échantillons proches et éloignés de la limite (7%).

- Na-Plagioclase :** Les teneurs en Na-plagioclase varient de 0% à 5% pour l'ensemble de la coupe mais ne dépassent jamais 3% aux alentours de la limite KT. La couche argileuse atteint des teneurs en plagioclase de 1%. On remarque que les pourcentages sont plus importants au-dessus de la limite KT (Danien).
- Dolomite :** Les teneurs en dolomite varient entre 0.3% et 5.6% tout au long de la coupe et autour de la limite KT, excepté l'échantillon G38 qui atteint 19.08%. La teneur moyenne est de 1.2%. Les pourcentages atteints par la couche argileuse varient entre 0.07% et 0.52% (moyenne de 0.29%).
- K-Feldspaths :** Les K-feldspaths montrent des teneurs variant entre 0.0% et 1.0% le long de la coupe et ne dépassent pas les 0.7% autour de la limite KT, excepté l'échantillon F9 (6.5%). La couche argileuse montre des valeurs ne dépassant pas les 0.52% avec une moyenne de 0.18%. La moyenne des teneurs en feldspaths pour la coupe ainsi que pour les échantillons proches de la limite est identique et de 0.25%.
- Ankérinite :** Les teneurs en ankérinite varient entre 0% et 0.65% pour la coupe dans son ensemble. Autour de la limite KT, les valeurs se situent entre 0% et 0.16% seulement. La moyenne des teneurs en ankérinite pour la coupe et la limite est très faible et se situe aux alentours de 0.05%. Les pourcentages atteints par la couche argileuse varient entre 0% et 0.09% (moyenne de 0.04%).





7.2.2 Rapport Calcite/Détritisme

Ce rapport (calcite/(quartz+feldspaths-K+phyllosilicates)) reflète les changements de climats et d'érosion tout au long de la coupe de La Spesse (cf. **Fig 7.2**). Une augmentation du contenu carbonaté reflète généralement une source détritique plus éloignée et donc des eaux plus profondes, limitant ainsi l'influence du continent. Au contraire, une augmentation des apports détritiques indique une source proximale, un bas niveau marin ou un environnement d'eau peu profonde ou encore une activité tectonique intense se déroulant sur le continent. Les valeurs semblent diminuer de la base de la coupe, jusqu'à la transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto, puis restent beaucoup plus stables jusqu'au sommet, montrant un milieu plus détritique, indiquant des apports terrigènes plus importants, une production carbonatée légèrement plus faible et donc un environnement plus proche des côtes.

En observant plus attentivement autour de la limite KT, une périodicité est observée pouvant nous donner des indications eustatiques. Une approximation du niveau marin a été calculée en lissant manuellement la moyenne mobile à 3 valeurs du rapport calcite/détritisme et en se basant sur la littérature déjà présente (cf. **Fig 7.2**). En effet, Macleod *et al.* (1996) et Adatte *et al.* (2002) ont défini la base de la zone P0 comme une zone de haut niveau marin caractérisée par l'extinction en masse des foraminifères planctoniques tropicaux et subtropicaux et des nannofossiles calcaires, expliquant ainsi la chute de la production carbonatée. Le maxima eustatique situé autour de la limite KT a été déplacé en conséquence.

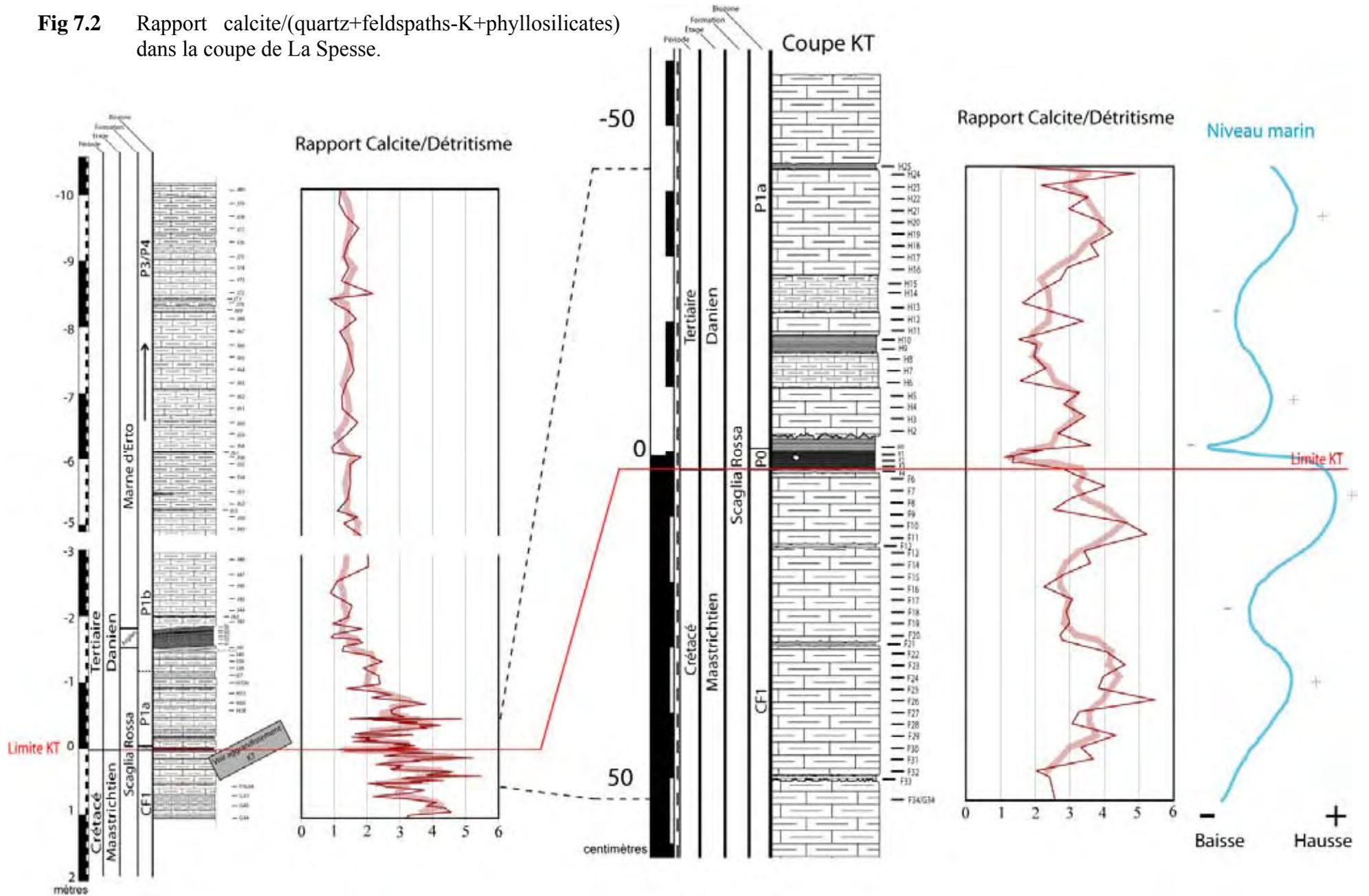
Cette diminution des valeurs de la calcite est déjà observée une dizaine de centimètres avant la limite et celles-ci augmentent rapidement juste au-dessus de la couche argileuse, appuyant ainsi l'hypothèse d'un hiatus au sommet de ces argiles discutée dans l'étude biostratigraphique (Chapitre 6). Le minimum est donc placé juste au-dessus de la biozone P0, où les indices d'une régression ont été observés.

7.2.3 Interprétations

Les teneurs en calcite sont très importantes tout au long de la coupe de La Spesse, mais semblent diminuer au-dessus de la limite. Les teneurs en phyllosilicates montrent une image inverse et paraissent augmenter au-dessus de la limite, tout comme le plagioclase, indiquant des apports continentaux plus importants. Ces apports de matériel clastique peuvent provenir de la chaîne des Alpes en formation. Le dépôt de flyschs commence effectivement dans la formation surmontant les marnes d'Erto ; les premières arrivées peuvent donc survenir dans le Danien. La régression marine débutant à la fin du Crétacé (Hallam 1989, Hallam *et al.* 1999) peut également jouer un rôle dans cette augmentation des apports continentaux. L'apparition de quartz dans la lame I36 (cf. Chapitre 5 (Microfaciès)) environ 1 mètre au-dessus de la limite est également remarquée dans l'étude minéralogique. Les faibles teneurs en feldspath potassique ne permettent pas d'utiliser ce minéral pour confirmer cette évolution du détritisme.

Les échantillons étudiés autour de la limite KT semblent toujours riches en calcite et relativement pauvres en quartz et phyllosilicates, impliquant donc un haut niveau marin. À la limite, la teneur en calcite diminue fortement (Argiles). Comme les sources principales de ce minéral sont le nannoplancton calcaire et les foraminifères, une crise biologique peut-être suggérée à la limite KT, diminuant ainsi la production carbonatée.

Fig 7.2 Rapport calcite/(quartz+feldspaths-K+phyllosilicates) dans la coupe de La Spesse.



7.3 Minéralogie des argiles

La composante argileuse de la section de La Spesse a été déterminée dans environ 80 échantillons ; 82 pour la fraction <2 µm, 78 pour la fraction comprise entre 2 µm et 16 µm et 82 pour la fraction <2 µm glycolée. L'analyse a été focalisée sur la limite KT et à partir de 50 cm de part et d'autre de celle-ci, les échantillons ont été sélectionnés de manière plus espacée. Les données obtenues en CPS sont imprimées sous forme de graphiques et de listings. Les valeurs de K001 (kaolinite) et C002 (chlorite) doivent être déterminées par calcul :

$$K001 = \frac{K002}{K002 + C004} \quad C002 = \frac{C004}{K002 + C004}$$

Les pourcentages relatifs de micas, kaolinite, chlorite, interstratifiés et smectite sont ensuite calculés pour chaque échantillon. D'autres informations sur la nature des micas et de la chlorite peuvent être obtenues en établissant des diagrammes triangulaires mettant en relation différents pics des micas (M001, M002, M005) et de la chlorite (C001, C002, C003).

7.3.1 Les minéraux argileux

Il existe trois types de structures présentes dans les minéraux argileux qui sont différenciées selon le nombre de couches constituant les feuillets (cf. **Fig 7.3**).

- Tout d'abord, le type 1/1, le plus simple, qui est formé d'un feuillet à deux couches, l'une tétraédrique composée de silice et l'autre octaédrique, d'alumine. L'épaisseur de ce feuillet est de 0,7 nm, espace interfeuillets compris. L'exemple le plus connu de ce groupe est la *kaolinite*.
- Le type 2/1 ensuite, est constitué d'un feuillet à trois couches, deux couches de silice entourant une couche d'alumine. Les **argiles micacées**, comme les *illites* (épaisseur constante de 1 nm) et les *vermiculites* (épaisseur variable de 1 à 1.5 nm) mais aussi les **argiles gonflantes** que sont les *smectites*, les *montmorillonites* (l'épaisseur des feuillets peut atteindre 2 nm par hydratation) font parties de ce groupe.
- Enfin, le type 2/1/1 est composé par un feuillet à trois couches complété d'une couche supplémentaire octaédrique à base de magnésium. Il s'agit d'argiles à faible capacité d'échanges comme les *chlorites*. Elles ne sont pas gonflantes et l'épaisseur des feuillets reste donc fixe.

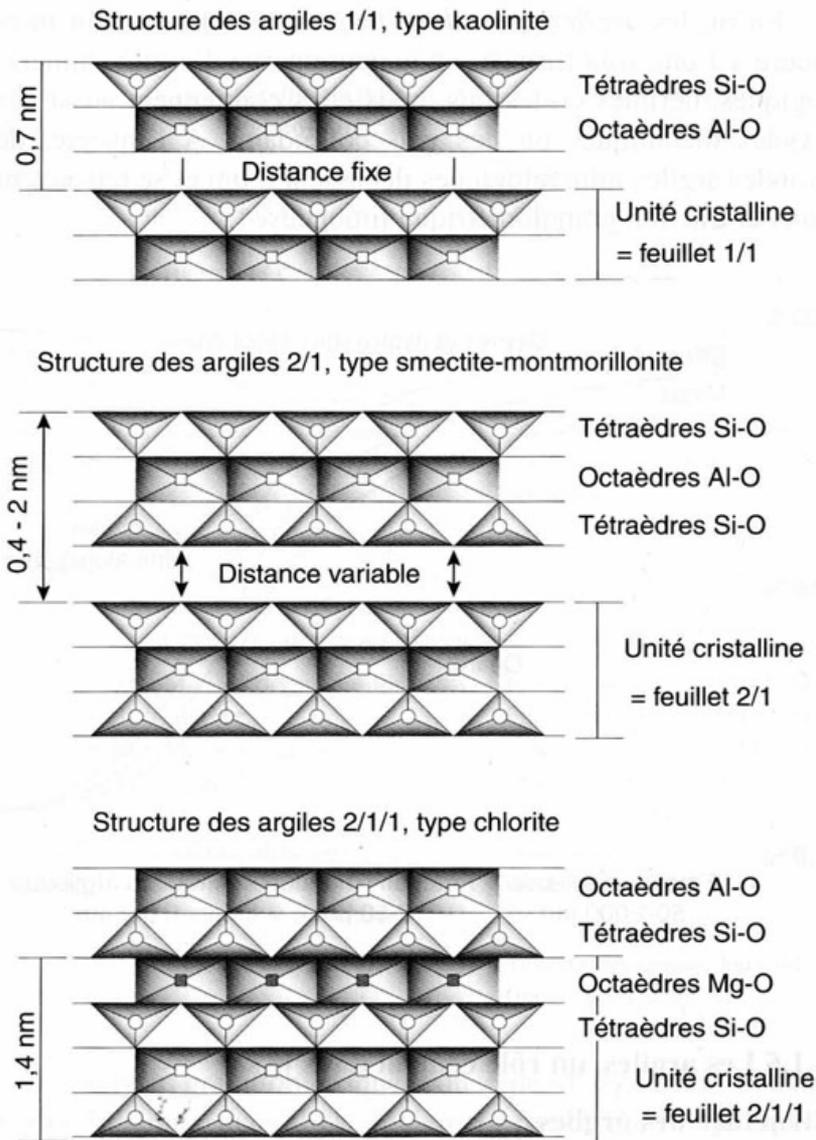


Fig 7.3 Structure minéralogique des argiles. (d'après Gobat et al., 2003)

Les argiles proviennent principalement de l'altération des roches par hydrolyse de minéraux silicatés. Leur grande diversité est due aux multiples interactions entre biosphère et lithosphère. Couplées aux nombreuses conditions climatiques existantes, ces interactions entraînent évidemment un nombre important de types d'altérations possibles.

De plus, les argiles possèdent trois propriétés qui jouent un rôle important, notamment dans l'évolution des sols.

Elles sont électronégatives, ce qui leur permet d'effectuer des échanges et des liaisons avec leur entourage à charge protonique. Elles ont un pouvoir de dispersion et de floculation. Elles sont hydrophiles, surtout les gonflantes de type 2/1, ce qui leur permet de laisser pénétrer l'eau dans leur espace interfeuillet et de provoquer ainsi un gonflement qui permet une augmentation de la capacité hydrique du sol et une variation de volume très importante, pouvant aller jusqu'à une multiplication par dix. (Gobat et al., 2003)

7.3.2 Signification paléoenvironnementales des argiles

L'étude de la formation des minéraux argileux permet d'obtenir des indications sur l'altération et les conditions climatiques, le type de roche mère ainsi qu'une évaluation de l'origine et de l'abondance du détritisme. (Adatte, 2005)

On reconnaît 3 origines possibles aux argiles :

- Détritique (hérité)** C'est l'apport d'éléments phylliteux formés ailleurs sur le continent et transportés soit par l'eau, soit par le vent. Au cours du transport, les argiles déjà formées ne subissent que de faibles modifications de structures et de compositions. En général, elles arrivent ensuite dans la mer ou dans les bassins lacustres. Ces sédiments argileux hérités donnent des informations sur le style d'altération et le climat des régions continentales où ils se sont formés.
- Par transformation** Dans certains cas, les minéraux argileux conservent quelques caractères structuraux des matériaux originels, mais ils subissent au cours du transport des transformations qui peuvent être importantes et qui font passer d'un type minéralogique à un autre par « dégradation », c'est-à-dire par soustraction de certains éléments ou par « aggradation ». Ces phénomènes peuvent prendre place *in situ* ou au cours du transport. Ce type d'argiles représente un intérêt tout particulier pour les pétroliers car il peut donner des informations sur l'enfouissement des sédiments.
- Authigénique (néoformé)** Les minéraux argileux sont, dans ce cas, formés par précipitation d'ions en solution : Si, Al, K, susceptibles de réagir entre eux quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange. Les composés ainsi formés sont stables dans les conditions physico-chimiques du milieu où ils ont pris naissance. (Caillere *et al.*, 1989)

Les régions formées de peu de reliefs qui subissent beaucoup de précipitations mais que peu d'érosion, sont touchées par une altération principalement chimique, ce qui favorise la formation de minéraux argileux néoformés comme la *kaolinite* et la *smectite*. Par contre, des régions composées de reliefs importants entraînent des températures annuelles froides et peu de précipitations, provoquant ainsi une altération mécanique importante. Ces dernières conditions empêchent une altération chimique intense et favorisent la formation de *chlorite* et d'*interstratifiés*.

La **kaolinite** se forme principalement sous des conditions climatiques tropicales à subtropicales sous lesquelles les précipitations et l'altération chimique sont intenses.

La **smectite** provient de l'altération chimique des roches volcaniques et indique des conditions climatiques semi-arides avec une saisonnalité bien marquée alternant des périodes humides et sèches.

Les **micas** proviennent de l'altération mécanique des roches ignées et métamorphiques et permettent d'évaluer l'importance du détritisme.

La **chlorite** provient de l'altération mécanique des silicates ferromagnésiens sous des conditions arides avec un climat froid.

Les **interstratifiés** indiquent un climat semi-aride à saison contrasté.

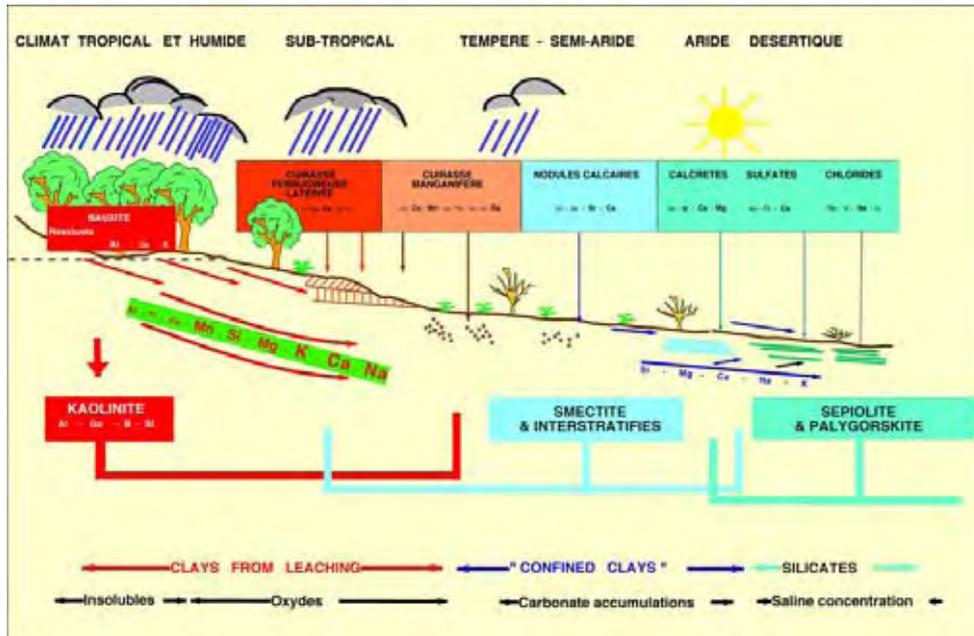


Fig 7.4 Altération superficielle et néoformation des minéraux argileux en fonction des différentes zones climatiques. (Adatte 2005, modifié d'après Tardy 1981)

6.3.3 Résultats fraction <math> < 2\mu\text{m}</math>

Les observations des fractions fines seront également discutées à une échelle globale (G44 à J80), puis focalisée sur les échantillons proches de la limite KT (F34 à H25), excepté la couche argileuse (H1 à F4) qui sera traité séparément. Une moyenne mobile sur 3 valeurs a été calculée, afin de montrer les tendances principales de ces courbes.

Smectite : Dans cette coupe, la smectite semble un peu transformée et composée de 80 à 90% de smectite et de 10 à 20% d'illite (Adatte, comm. pers.). Cette smectoïde est donc l'argile la plus abondante dans cette fraction. Les teneurs pour l'ensemble de la coupe varient entre 5% et 48% environ, pour une moyenne de 28%. Cependant, des teneurs très faibles (1%, 4% et 9%) sont observées dans les argiles de transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (A1 à A6).

Les échantillons proches de la limite montrent des teneurs aux alentours de 35%, mais celles-ci diminuent à 10% environ à partir de 30cm au-dessus de la limite. La teneur moyenne avant la limite KT est de 40%, alors qu'après, elle est de seulement 23%.

La teneur moyenne de la couche argileuse est de 34% avec un pic à 22% seulement (E2).

Mica :

Le mica est également très abondant dans cette coupe. Les teneurs aux alentours de la limite KT ainsi que le long de la coupe dans son ensemble se situent entre 9% et 40% avec une moyenne à 27%. Cependant, 2 pics importants (44% et 81%) sont observés dans les argiles de transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto. La teneur moyenne de la couche argileuse de la limite KT est de 31%. L'échantillon E2 montre ici une teneur importante (39%), contrairement à la smectite.

La courbe de la teneur en mica semble en plusieurs endroits être une image inverse de la teneur en smectite.

Kaolinite :

La kaolinite montre des teneurs variant de 5% à 46% pour l'ensemble de la coupe ainsi que pour les échantillons proche de la limite KT, excepté un échantillon des argiles de transitions entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (A5) qui atteint seulement 1%. La moyenne se situe aux alentours de 16%.

A partir de 30 cm au-dessus de la limite KT, on remarque une augmentation des teneurs en kaolinite. Les valeurs se situent entre 5% et 28%, puis passent à 18% et 46%. La diminution des teneurs en smectite au même endroit est compensée par une augmentation des teneurs en kaolinite.

La couche argileuse de la limite KT montre des valeurs se situant entre 8% et 14% pour une moyenne de 11%.

Chlorite :

Les teneurs en chlorite varient de 3% à 39% pour l'ensemble de la coupe et à partir de 6% pour les échantillons proches de la limite, excepté un échantillon des argiles de transitions entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (A5) qui atteint seulement 1%. La moyenne est d'environ 13%.

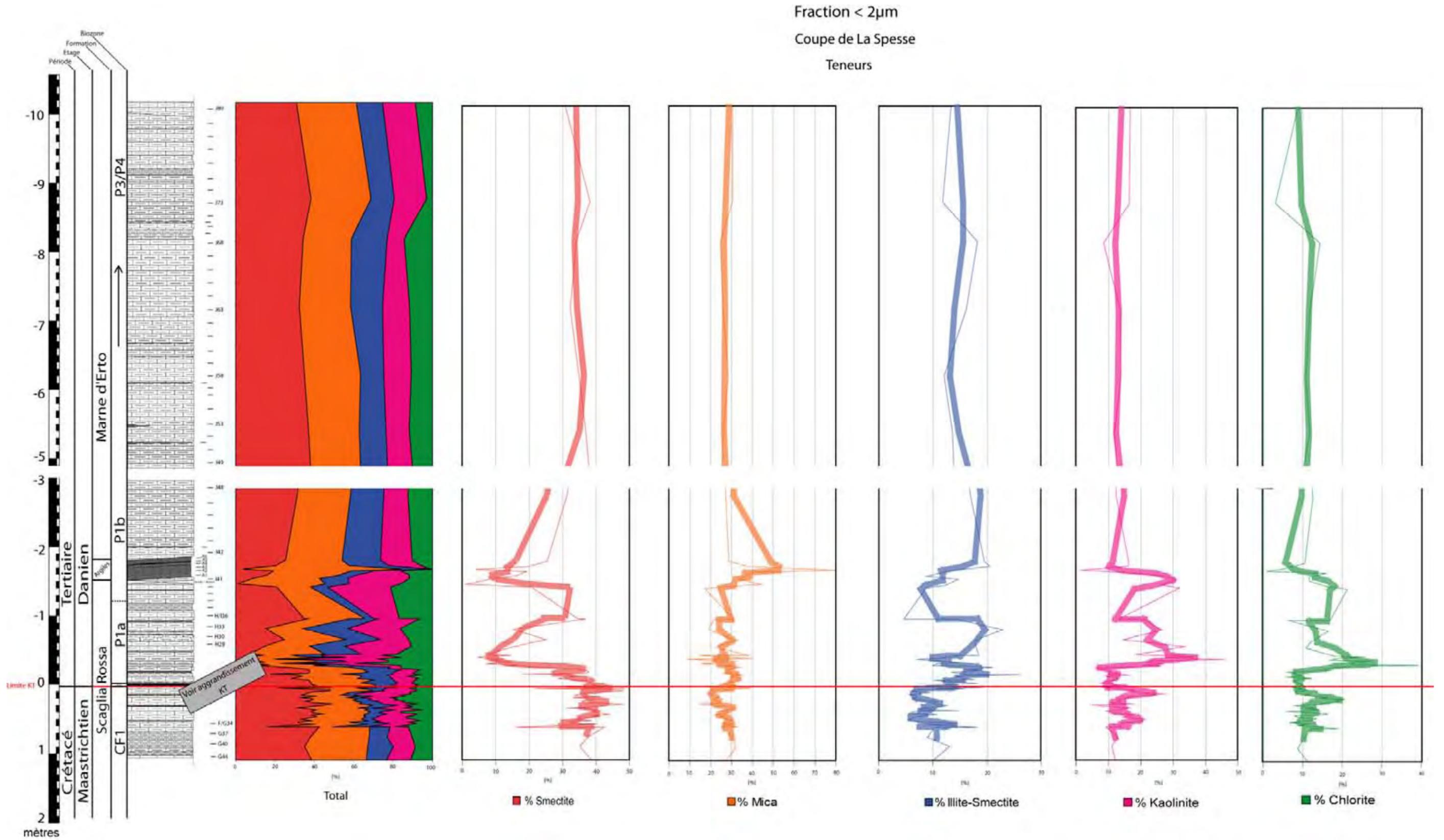
Aux alentours de la limite KT, les valeurs se situent entre 6% et 21%, puis augmentent 30 cm au-dessus de la limite KT (pour atteindre des valeurs variant de 17% à 39%). La diminution des teneurs en smectite au même endroit semble donc être également compensée par une augmentation des teneurs en chlorite en plus de celles de la kaolinite.

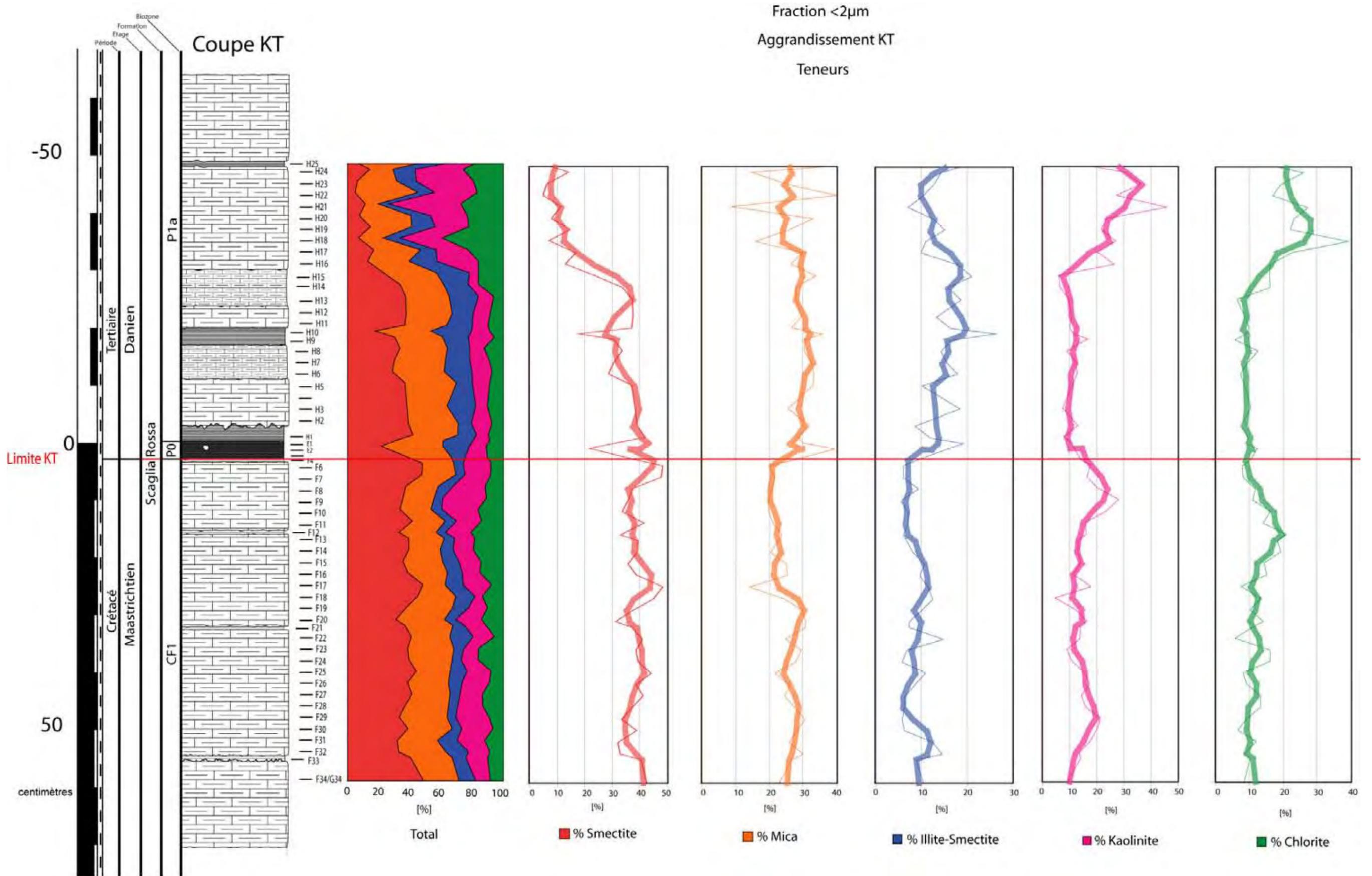
La couche argileuse de la limite KT montre des valeurs se situant entre 9% et 11% pour une moyenne de 10%.

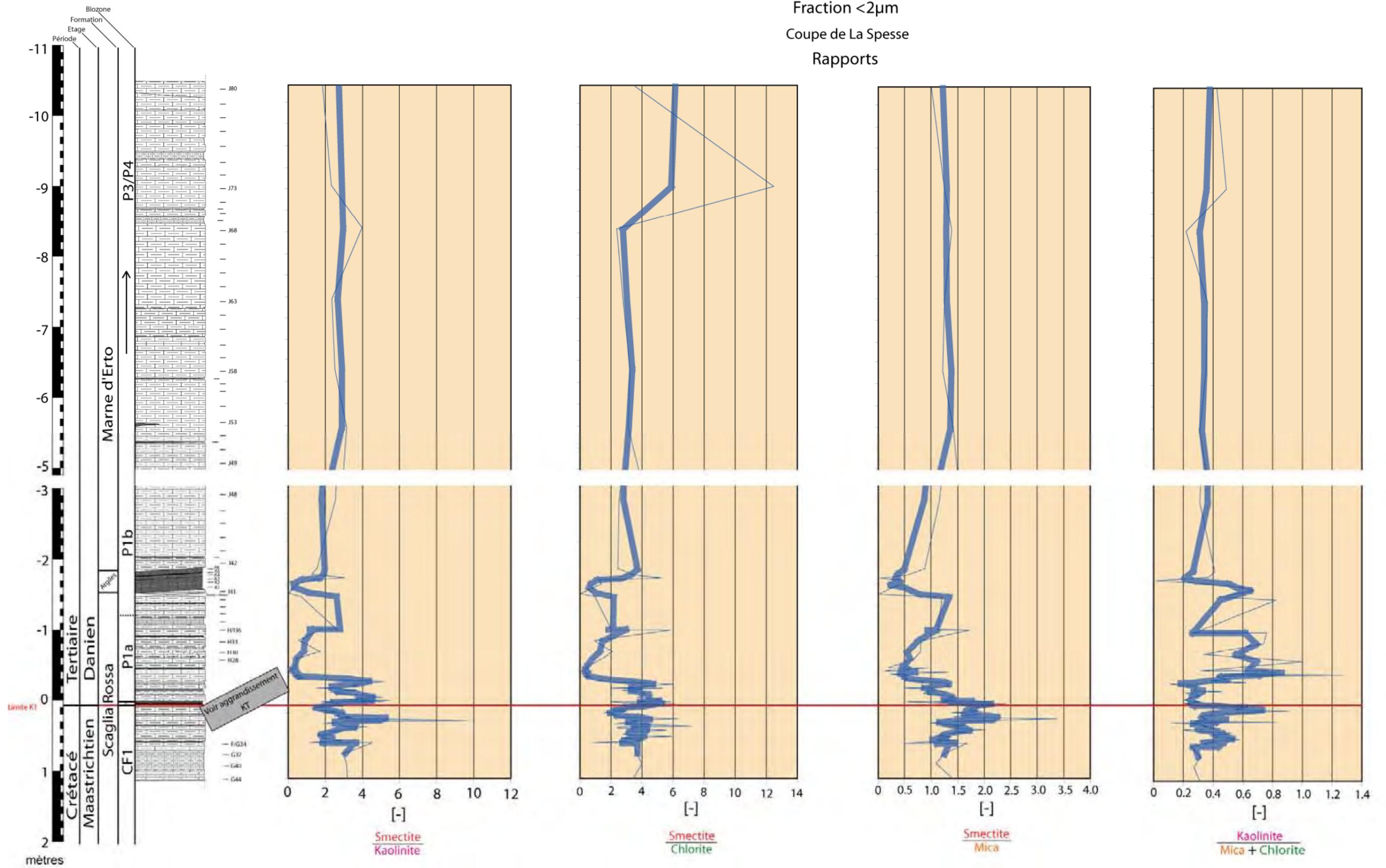
Interstratifiés : Les interstratifiés de type illite-smectite montrent des teneurs variant de 6% à 26% pour l'ensemble de la coupe ainsi que pour les échantillons proche de la limite KT. La moyenne des teneurs est d'un peu plus de 11%.

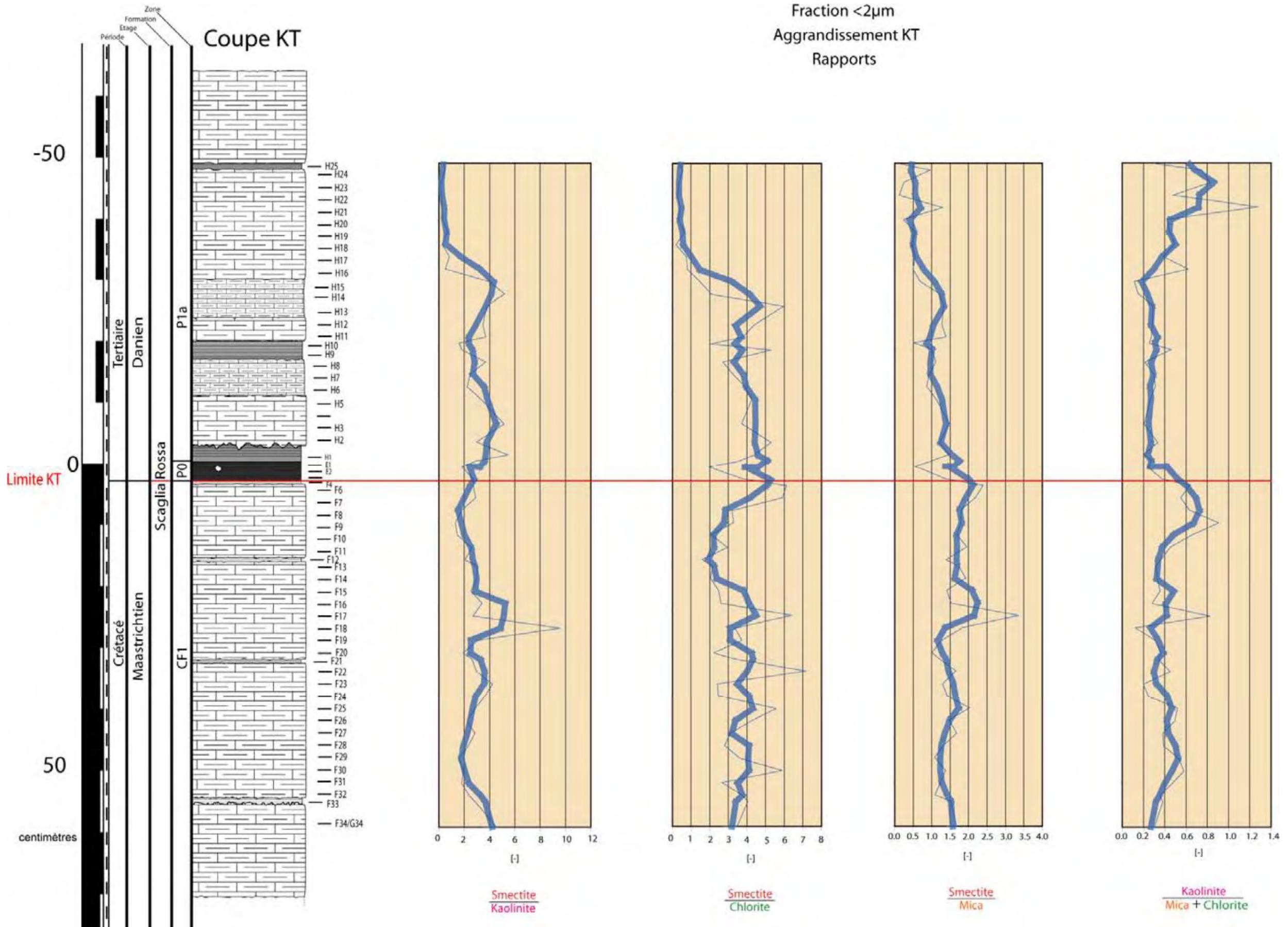
Avant la limite KT, les teneurs varient entre 6% et 15% pour une moyenne de 9%, alors qu'après celle-ci, elles se situent entre 7% et 26% pour une moyenne atteignant 15%.

Les teneurs en illite-smectite de la couche argileuse de la limite KT se situent entre 6% et 19% pour une moyenne de 14%.









7.3.4 Détermination de la nature des micas pour la fraction <math><2\mu\text{m}</math>

Selon la nature des cations présents dans leurs réseaux cristallins, ils existent 4 sortes de micas : La biotite, l'illite, la phengite et la muscovite. Une méthode mise au point par Rey et Kübler (1983) permet d'obtenir des informations sur la composition des minéraux et non la composition chimique exacte. On insère dans un diagramme ternaire les différents pics d'intensité du mica (M001, M002 et M005) exprimés en CPS et normalisés à 100% (cf. **Fig 7.5**). Les pics utilisés (8.85° , 17° et 45.5°) sont ceux de la fraction $<2\mu\text{m}$.

Dans cette étude, 60 échantillons de la fraction $<2\mu\text{m}$ ont été calculés. 37 échantillons se trouvent dans le champ de la phengite, 11 se situent entre la phengite et la muscovite, 8 entre la phengite et l'illite et 2 seulement pour l'illite et la muscovite.

La coupe de La Spesse montre une prédominance de phengite avec une légère tendance vers la muscovite. Les phengites peuvent se décrire comme des micas dioctaédriques auxquels on substitue une partie des cations Al dans les sites octaédriques par du Mg. Ce type de mica résulte de l'altération des roches ignées et métamorphiques et indique donc une origine détritique. Sa présence majeure permet donc d'exclure une formation authigénique des minéraux argileux.

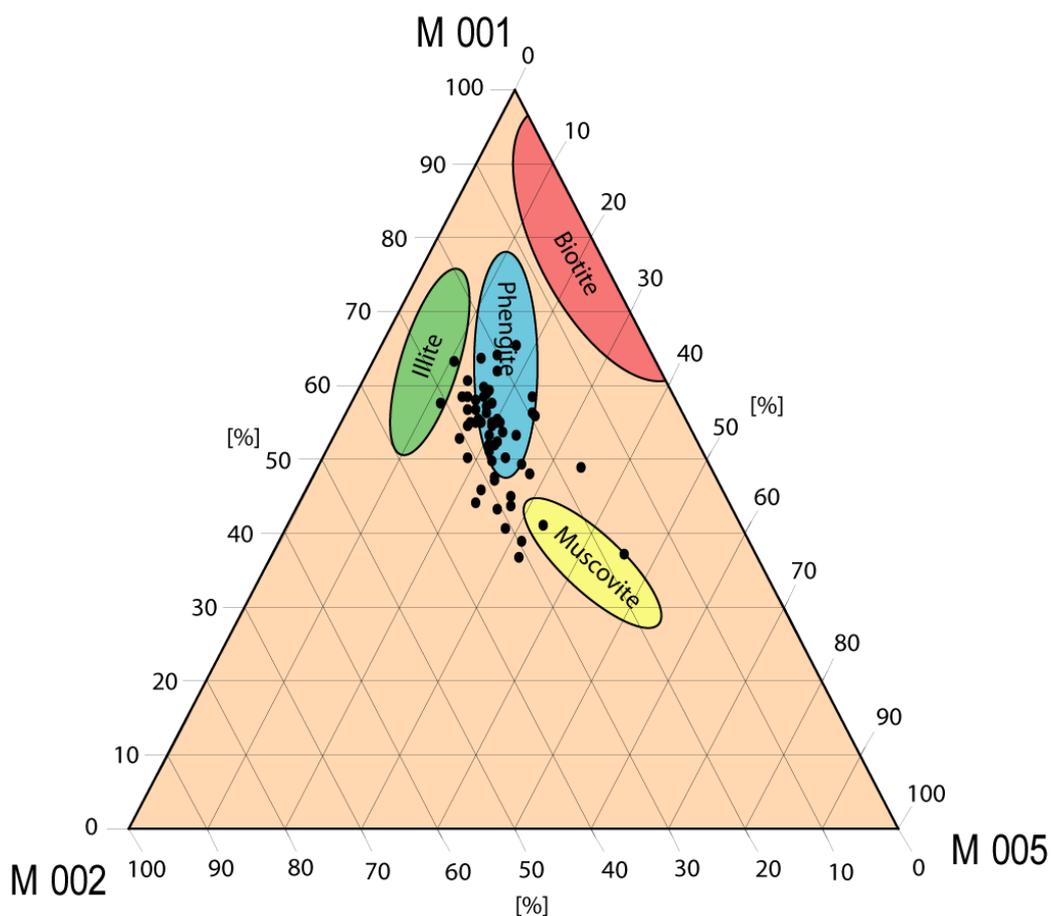


Fig 7.5 Diagramme ternaire des micas pour la fraction $<2\mu\text{m}$.

7.3.5 Résultats fraction 2-16 μ m

Mica : Les teneurs en mica varient entre 25% et 66% sur l'ensemble de la coupe pour atteindre une moyenne de 48%, ce qui en fait l'argile la plus présente pour la fraction 2-16 μ m.

Les échantillons autour de la limite KT varient de la même façon, mais montrent des valeurs ayant pour moyenne 43%.

On remarque une augmentation des valeurs dans la couche argileuse (E1, 68% et E2, 67%). La teneur moyenne est de 58%.

Chlorite : La chlorite montre des teneurs variant de 21% à 49% pour l'ensemble de la coupe ainsi que pour les échantillons proche de la limite KT. La moyenne des teneurs est d'un peu plus de 35%.

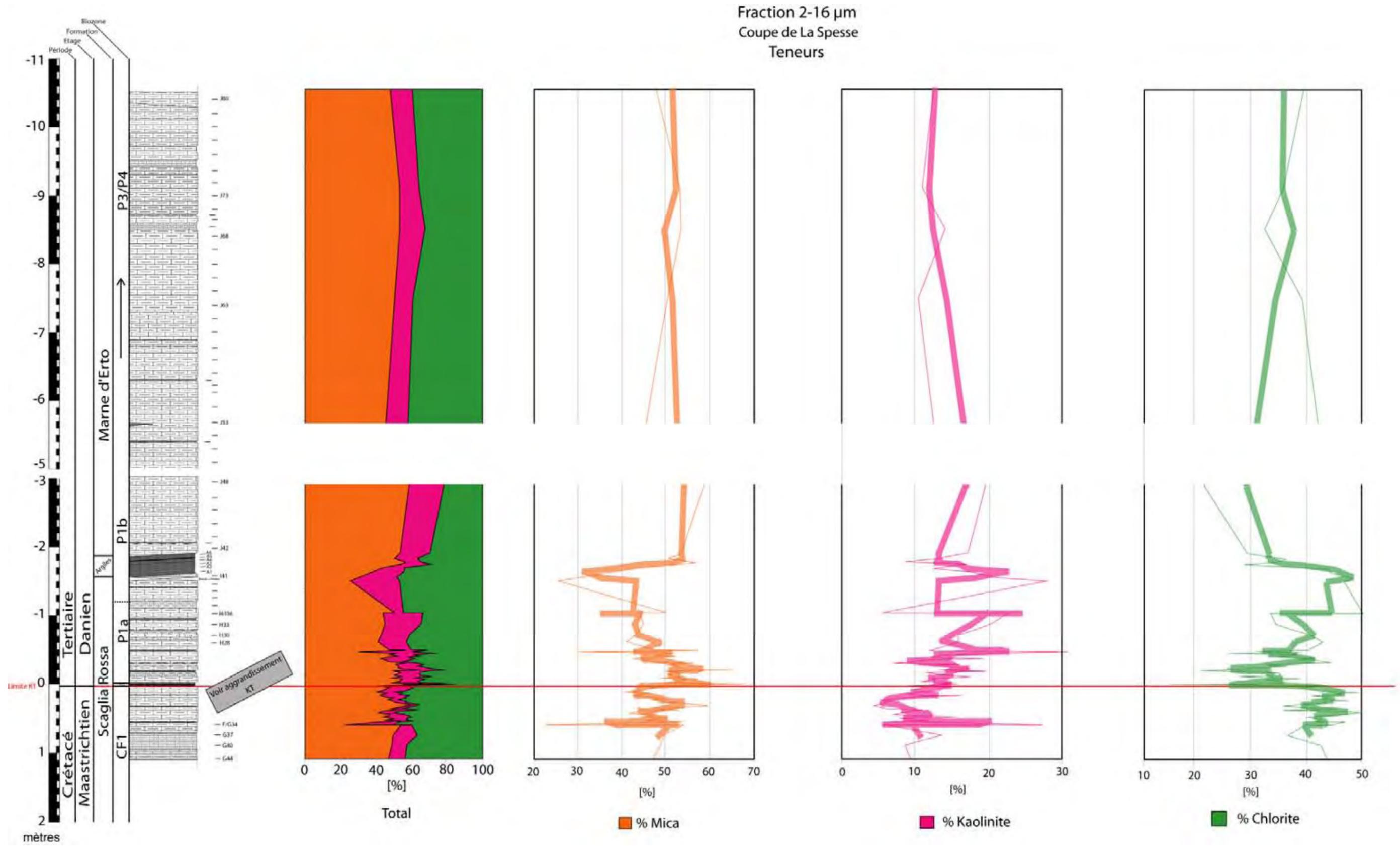
Les échantillons du Maastrichtien proche de la limite KT montrent des teneurs en chlorite plus élevées (43% en moyenne) que les représentants du Danien (34% en moyenne).

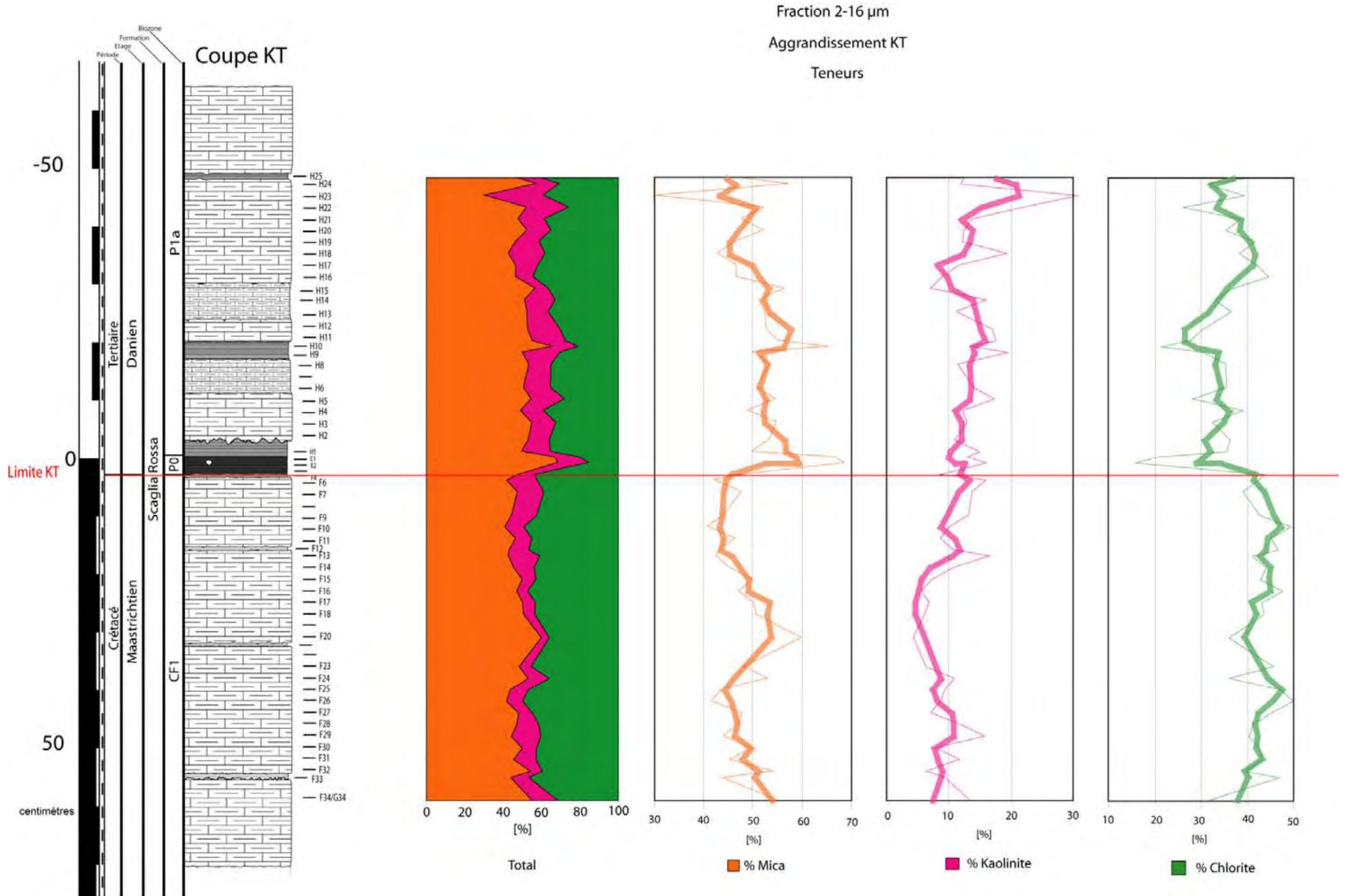
On observe dans la couche argileuse de la limite KT un comportement inverse par rapport au teneur en mica. En effet, les échantillons E1 et E2 montrent des valeurs basses (20% et 16%)

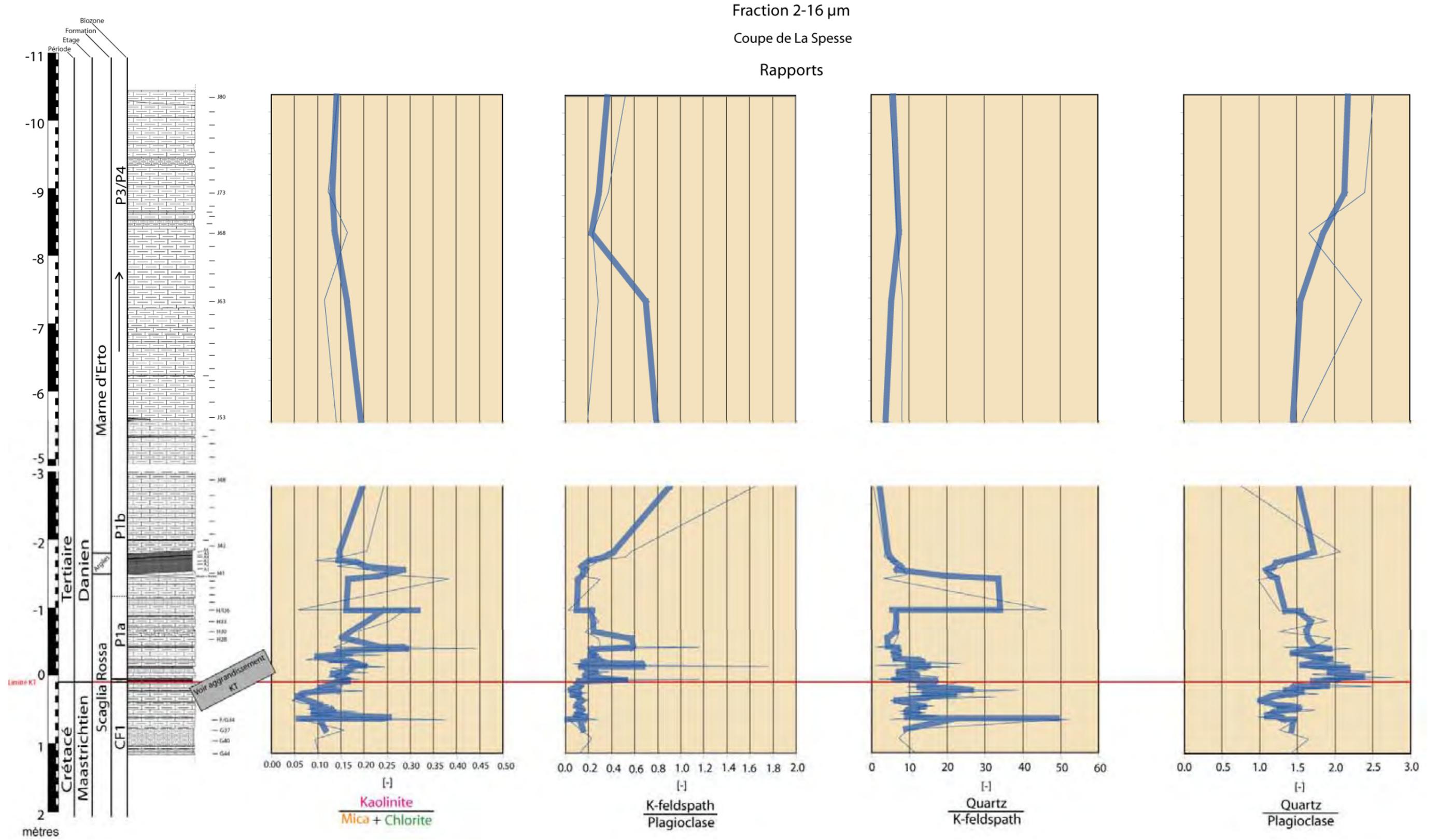
Kaolinite : Les teneurs en kaolinite varient entre 4% et 31% pour une moyenne de 13% environ.

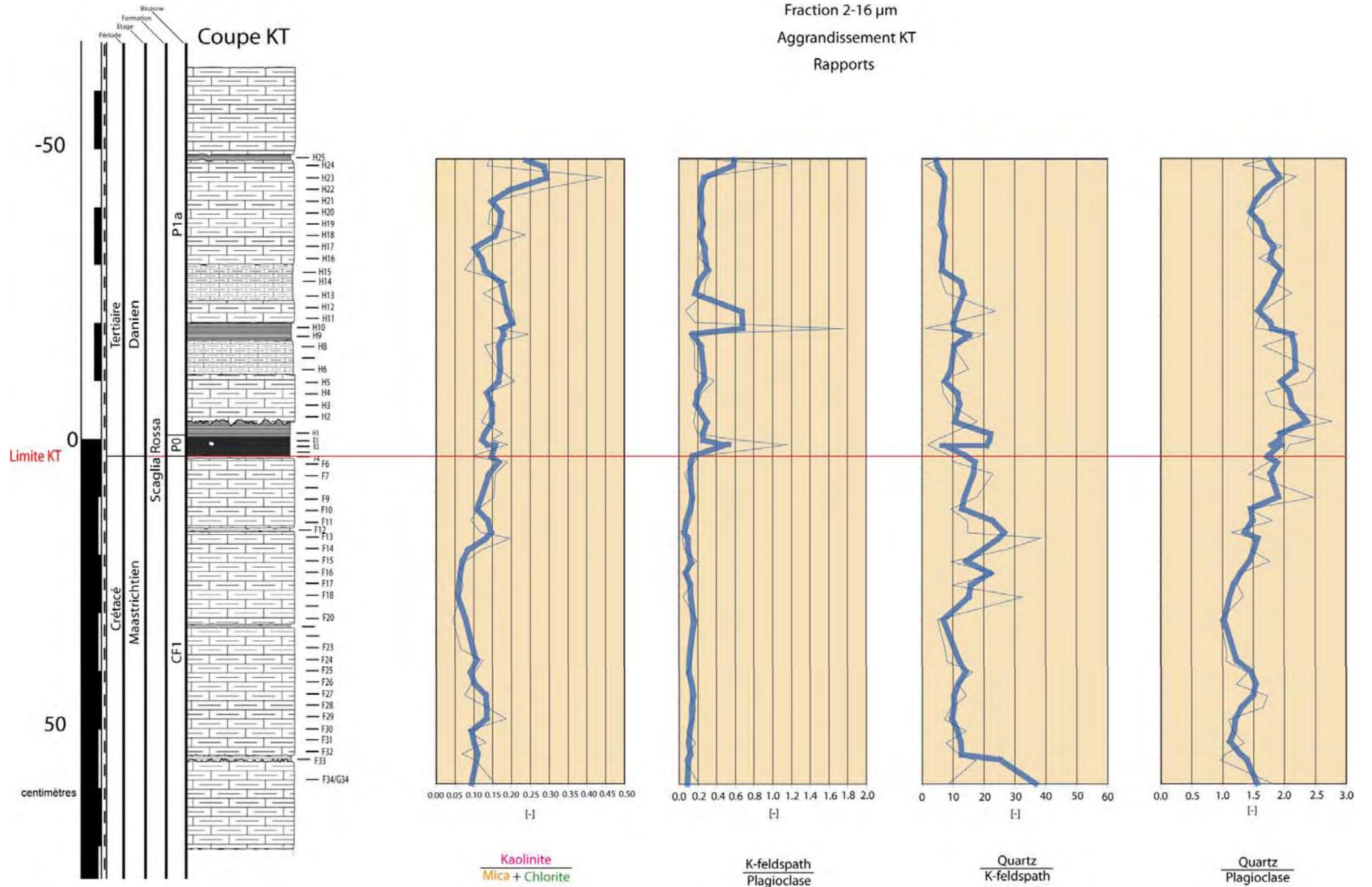
Les échantillons proches de la limite KT montrent des valeurs un peu plus importantes dans le Tertiaire (14% en moyenne), comparées aux valeurs observées du Crétacé (10% en moyenne).

La couche argileuse à la limite montre des valeurs se situant entre 9% et 16%, pour une moyenne de 13%.









7.3.6 Détermination de la nature des chlorites pour la fraction 2-16 μ m

73 échantillons de la fraction 2-16 μ m ont été utilisés pour calculer la nature des chlorites présentes dans la coupe de La Spesse (cf. **Fig 7.6**). 65 exemplaires montrent des chlorites riches en Mg-Fe, dont 14 seulement proviennent d'échantillons dont l'excès en fer se situe dans les couches hydroxylées. L'excès en fer provient donc des couches silicatées principalement. 8 points ne semblent correspondre à aucun groupe.

L'origine des chlorites ne semble pas liée au métamorphisme ou à la diagenèse, mais plutôt au détritisme. En effet, la zone d'étude n'a subi que peu de métamorphisme lors de la formation des Alpes (cf. Chapitre 2 (Situation)).

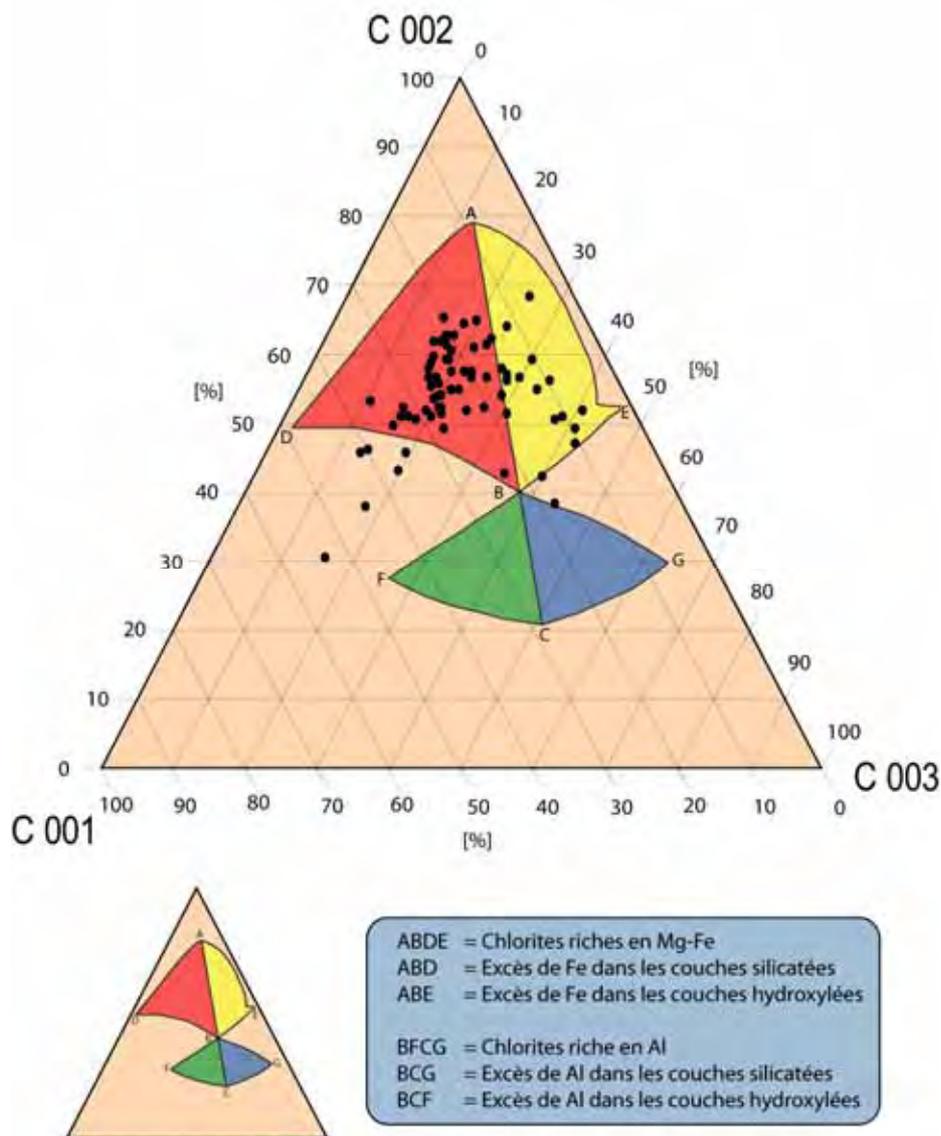


Fig 7.6 Diagramme ternaire de la chlorite pour la fraction 2-16 μ m

7.3.7 Interprétations

La teneur en smectite est très importante dans cette coupe, mais une chute en faveur de la kaolinite et de la chlorite est observée 30cm au-dessus de la limite alors qu'une légère diminution est observée à partir du Danien précoce déjà. La smectite indique un climat chaud à saisons contrastées. Sa structure fine, en flocons permet un transport distal. Cette argile est donc concentrée au centre des bassins océaniques et est représentative d'un milieu de dépôt profond. De plus, ce phyllosilicate est très sensible à la diagenèse et sa présence indique donc des transformations diagénétiques assez faibles tout au long de la coupe.

Une légère augmentation des teneurs en micas et en interstratifiés est observée à partir de la limite KT déjà, favorisant l'altération mécanique plutôt que chimique. La forte teneur en ces minéraux, indique donc un climat plus froid avec moins de précipitations, favorisant ainsi l'altération physique. L'effet d'une baisse du niveau marin (Hallam 1989, Hallam *et al.* 1999) ou d'un rapprochement des côtes peut ainsi être observée depuis la transition Maastrichtien-Danien. L'orogénèse alpine peut également influencer les assemblages argileux et favoriser les apports détritiques.

La kaolinite nécessite des précipitations plus intenses, favorisant une altération chimique. Un changement climatique peut donc expliquer l'augmentation des teneurs en ce minéral durant le Danien (30cm au-dessus de la limite) après la baisse observée depuis la transition Crétacé-Tertiaire. Une légère augmentation est également observée quelques centimètres sous la limite KT et également à environ 50cm sous celle-ci, correspondant peut-être à des variations eustatiques (cf. **Fig 7.2**).

La chlorite augmente également 30cm au-dessus de la limite KT, indiquant ainsi une origine plutôt détritique que climatique pour la kaolinite et la chlorite à cet endroit, ces deux minéraux se formant sous des conditions climatiques distinctes. Juste sous la limite, une légère augmentation de la chlorite précède un accroissement des teneurs en kaolinite.

Les résultats des fractions comprises entre 2 et 16 μ m montrent des résultats assez similaires mais toutes les tendances semblent moins marquées et légèrement plus floues. La zone d'étude étant située relativement loin de la côte et les particules étant plus grandes, ces argiles sont moins enclin à un transport distal que la fraction <2 μ m.

La chlorite montre cependant un comportement intéressant au passage de la limite KT. Une diminution bien marquée des valeurs est observée au profit du mica, avant l'augmentation 30cm dans le Danien déjà observée dans la fraction fine. Une augmentation sensible du détritisme suivie par une intensification peut donc sans doute être observée ici.

La kaolinite semble augmenter de manière assez graduelle tout au long de la transition Maastrichtien-Danien, suggérant une humidification croissante du climat.

En résumé, une première zone montrant un climat aride à saison contrastées peut être définie de la base de la coupe jusqu'à la limite KT.

Un climat plus froid et sec se met en place dès les premiers centimètres du Danien, favorisant une augmentation de l'altération physique. Une hausse importante de la kaolinite et de la chlorite au détriment de la smectite 30cm dans le Tertiaire montre des apports terrigènes importants, indiquant une altération des reliefs continentaux plus importante et peut-être une diminution de la distance depuis la côte. La fermeture de l'océan Téthys et le dépôt de flyschs proches de la zone d'étude peut expliquer ces variations des apports terrigènes. Sur le terrain,

la formation des flyschs éocènes n'est séparée de la Scaglia Rossa que par le dépôt des marnes d'Erto.

Les teneurs en smectite raugmentent ensuite 20 cm plus haut, mais chute au profit du mica dans la couche argileuse à la transition entre la Scaglia rossa et les marnes d'Erto. Cet événement peut être dû à une arrivée de matériel terrigène provenant de la chaîne des Alpes en formation.

Le haut de la coupe contient moins de données, mais semble montrer un milieu distal et stable à nouveau dominé par un climat semi-aride avec une alternance de périodes sèches et humides, favorisant la formation de smectite.

CHAPITRE 8

ANALYSES GÉOCHIMIQUES

8.1 Méthode

Les analyses géochimiques ont été effectuées entre les mois de février et de mai 2006 dans le laboratoire GEA de l'université de Neuchâtel par Plasma à Couplage Inductif associé à un Spectromètre de Masse (ICP-MS) (Elan 6100, Perkin Elmer).

Ce type de manipulation nécessite une préparation minutieuse, étant donné que l'on peut analyser des éléments traces notamment. Les poudres d'échantillons broyées à l'agate sont généralement utilisées, mais dans cette étude, les échantillons broyés ont été préalablement lavés dans une solution contenant du Deconnex à 1%, afin d'éliminer une partie des phyllosilicates et de réduire ainsi les résidus lors de la mise en solution. Comme les échantillons ne sont pas des calcaires purs, mais des sédiments marno-calcaires, la proportion qui a effectivement été solubilisée doit être prise en compte afin de ne pas interpréter des résultats partiels et donc non représentatifs de la totalité de l'échantillon. La fraction non solubilisée est généralement constituée d'argiles et de silicates. Les résultats doivent donc être étudiés avec précaution, notamment la couche argileuse de la limite KT, constitué d'argiles et de morceaux de carbonates diagenétiques observés en lames minces.

51 échantillons ont été analysés.

8.1.1 Minéralisation

Avant d'analyser tout échantillon par l'ICP-MS et de pouvoir ainsi quantifier les éléments majeurs, mineurs et en traces contenus dans celui-ci, une minéralisation au four à micro-ondes est nécessaire. Cette étape permet de mettre en solution les éléments contenus dans la matrice solide de l'échantillon et est basée sur le protocole 3051 de l'EPA (Environmental Protection Agency).

On mélange $250 \pm 0,5$ mg d'échantillon avec 10 ml d'acide nitrique à 65% dans une bombe en téflon hermétiquement fermée qui sera chauffée, selon un programme en température prédéfini, dans un four micro-ondes (Ethos plus, Milestone). Le minéralisat obtenu est ensuite filtré et le filtrat est récupéré dans des flacons en polypropylène de 100 ml. Le détail du protocole est expliqué en annexes 2.4.1.

8.1.2 Fonctionnement de l'ICP-MS

L'association d'une torche à plasma qui génère des ions (ICP, qui opère à pression atmosphérique) et d'un spectromètre de masse quadripolaire (MS, qui opère sous vide) a permis l'établissement de l'ICP-MS comme d'une technique majeure d'analyse (cf. **Fig 8.1**). En effet, ce dispositif est capable d'analyser rapidement plus de 70 éléments de façon très sensible, à l'exception de quelques éléments très légers (H, C, N, O), les gaz nobles et la

plupart des actinides (éléments 90 à 103). Des rapports isotopiques peuvent également être mesurés grâce à ce procédé.

Quatre étapes majeures peuvent être distinguées lors l'analyse des échantillons par ICP-MS : Introduction de l'échantillon-Nébulisation, Ionisation, Séparation en masse et charge, Détection.

L'échantillon est introduit dans le système sous forme liquide jusqu'à la chambre de vaporisation par une pompe péristaltique et est transformé en un très fin brouillard au contact du gaz vecteur, l'argon (nébulisation), avant que les éléments chimiques contenus dans celui-ci soient atomisés, puis ionisés dans leur totalité dans la torche à plasma (ionisation). Les cations obtenus sont ensuite accélérés en passant de la pression atmosphérique à un vide très poussé. Le faisceau passe dans un orifice de 1 mm au centre de 2 cônes avant d'être refocalisé en traversant des lentilles électrostatiques.

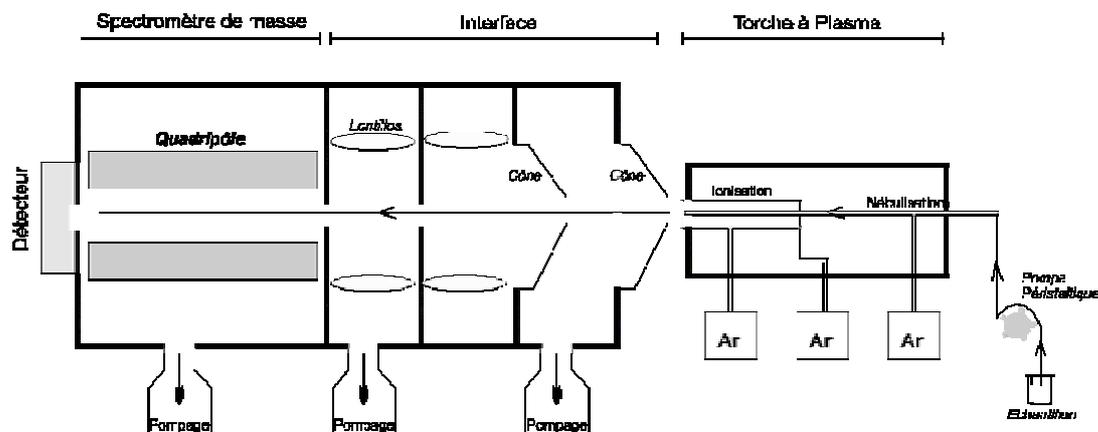


Fig 8.1 Schéma instrumental de l'ICP-MS.

On utilise enfin un analyseur quadripôle pour filtrer les ions avant de les enregistrer avec un détecteur d'ions à dynode (cf. Fig 8.2). L'analyseur quadripôle est constitué de quatre tiges parallèles et équidistantes d'un axe central. En appliquant un courant continu (DC) et un courant alternatif (RF) aux 2 paires de tiges opposées, il est possible d'obtenir une situation où le voltage du courant continu est positif pour une paire et négatif pour l'autre. Les courants alternatifs sont également de signes opposés mais de même amplitude. Les ions entrant dans le quadripôle sont alors contraints à emprunter des chemins oscillatoires précis par le voltage des radiofréquences (RF). En réglant les différents voltages, seuls les ions d'un certain rapport masse/charge seront capables de traverser le filtre et de ressortir à l'autre extrémité. Les autres ions seront perdus dans l'analyseur quadripôle. Grâce à un logiciel permettant le traitement quantitatif et qualitatif de l'enregistrement, le nombre d'ions mesuré, pour un isotope donné, permet de calculer directement la concentration de l'élément analysé.

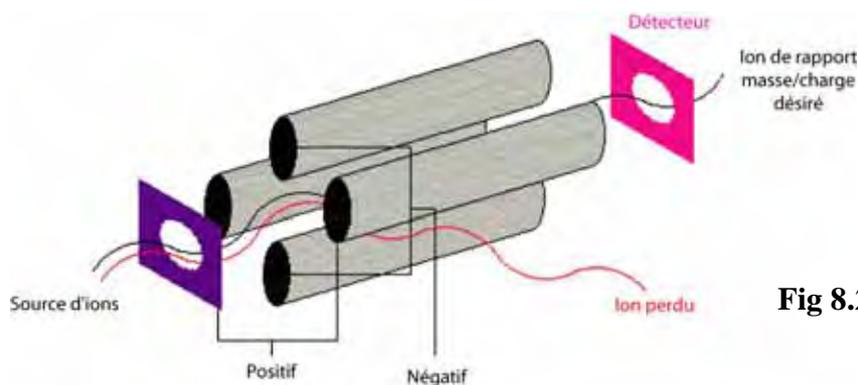


Fig 8.2 Schéma montrant le passage des ions à travers le quadripôle.

8.2 Introduction

Les concentrations des éléments traces dans les sédiments peuvent être utilisées pour effectuer des reconstitutions de la paléoproduktivité, des conditions d'oxygénation et des apports terrigènes, caractérisant ainsi l'environnement de dépôt.

La sédimentation des éléments dissous dans la colonne d'eau peut résulter de processus biogéniques ou non. En effet, certains éléments traces servent de nutriments mineurs au plancton et sont assimilés par leur organisme. L'adsorption sur des particules organiques ou minérales, la formation de complexes organo-métalliques et la précipitation d'oxyhydroxydes sont également possibles, mais ces processus sont passablement limités dans des conditions oxiques. Des dépôts riches en matière organiques ont donc souvent des concentrations importantes, car la matière organique en suspension permet un enrichissement par adsorption des éléments sur ces particules (Tribovillard *et al.*, 2006).

L'arrivée des éléments traces dans les océans peut être de provenance fluviale, éolienne ou hydrothermale. Certains de ces éléments peuvent être d'origine volcanique ou être liés à la chute et à la vaporisation de la météorite survenu à la limite KT. De plus, les pluies acides suivant l'essor du volcanisme du Deccan peuvent engendrer un lessivage important, augmentant ainsi l'altération continentale avant la transition Maastrichtien-Danien.

Snow *et al.* (2005) indiquent que la réactivité des éléments traces (temps de résidence) permet ou non un transport distal dans l'océan. Ainsi, le *cadmium* pourrait provenir d'un volcanisme océanique et être transporté loin de sa source, alors que le *cuivre* et le *zinc* se déposeraient aux abords des plateaux basaltiques seulement. Des apports atmosphériques (poussières) doivent également être envisageables, notamment dans le cas du volcanisme du Deccan qui se déroule sur terre ferme.

Le contenu métallifère d'une météorite de 10 km de diamètre peut augmenter le contenu océanique de manière significative (Erickson et Dickson, 1987). Le *nickel* pourrait également provenir des spinelles nickélifères formés lors de l'arrivée de la météorite.

Une activité hydrothermale intense peut également montrer des enrichissements importants en métaux traces. En effet, les concentrations de *fer* et de *manganèse* peuvent être un million de fois plus hautes dans une source d'eau à 350°C que dans les eaux environnantes (Holland et Turekian, 2003). Cependant, le *fer* est très vite déposé, alors que le *manganèse* peut être transporté loin de la source (Cowen *et al.*, 1998). Le *barium*, le *plomb* et le *zinc* font également partie des éléments enrichis dans cet environnement (Tribovillard *et al.*, 2006).

Durant la diagenèse, la mobilité de certains éléments traces peut modifier leur distribution et l'interprétation des conditions paléoenvironnementales. *Mo*, *V*, *Cd*, *Ni*, *Co*, *Cu*, *Zn* et *Pb* sont généralement considérés comme immobiles.

8.3 Comportement des éléments

Les apports terrigènes sont caractérisés par un apport d'*aluminium* et de *potassium* dans les sédiments ; la majeure partie de ces éléments étant liée aux mailles des minéraux de provenance terrigène (Murray et Leinen, 1993). La suppression de l'effet du détritisme sur les graphiques peut donc être obtenue en normalisant les éléments par un de ces deux éléments ; ceux-ci ayant un comportement similaire (cf. **Fig 8.5**). Le *potassium* a été préféré à l'*aluminium* pour des raisons analytiques et méthodologiques.

Les éléments P et Ba sont très utiles pour évaluer la paléoproduktivité. Une étude détaillée a été effectuée grâce à l'étude du phosphore (Chapitre 10), mais peut également être réalisée grâce à l'étude du *barium*, qui est fortement lié à la productivité (Dymond *et al.*, 1992). Malheureusement, ces éléments sont très vite solubilisés sous des conditions réductrices et peuvent disparaître dans des sédiments anoxiques (Tribovillard *et al.*, 2006).

Le *cuivre*, le *nickel*, le *zinc* et le *cadmium* peuvent jouer le rôle de nutriments mineurs et être ainsi utilisés par les organismes vivants avant d'être sédimentés de façon biogénique. Une indication sur la productivité primaire peut donc également être obtenue grâce à ces éléments. Le *nickel* et le *zinc* indiquent la présence de MO, même si celle-ci a partiellement ou totalement disparu après le dépôt (Tribovillard *et al.*, 2006). Les éléments tels que le *cadmium*, le *cuivre* et le *zinc* sont également souvent associés au volcanisme, alors que le *nickel* pourrait provenir de la désintégration d'une météorite.

Les éléments sensibles aux conditions redox ont tendance à être plus solubles sous des conditions oxydantes et moins solubles sous des conditions réductrices (dysoxique, anoxique, euxinique). Le terme euxinique désigne, d'après Algeo et Maynard (2004), un milieu anoxique en présence d' H_2S libre. Ainsi, l'*uranium*, le *vanadium* et le *molybdène*, sensibles aux conditions d'oxygénation, sont très utiles pour obtenir des informations sur les conditions redox de l'environnement de dépôt (Bodin *et al.*, 2006) (cf. **Fig 8.3**).

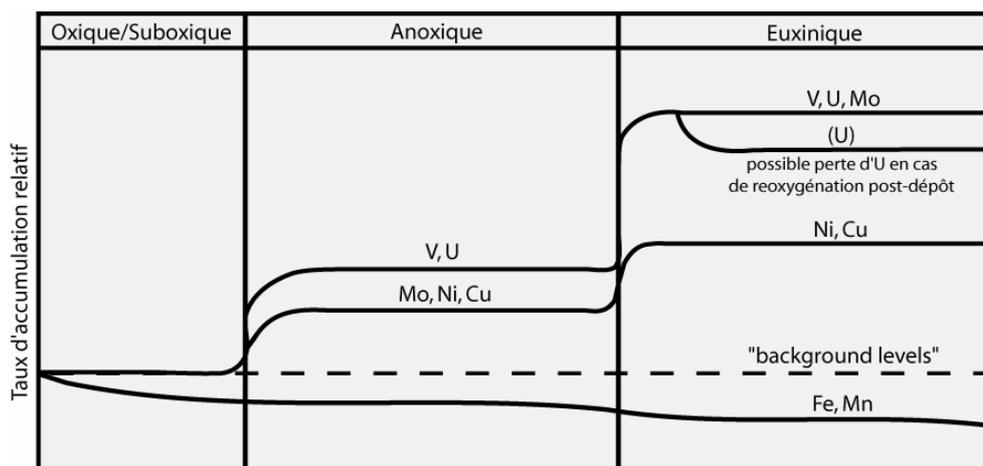


Fig 8.3 Comportement de Ni, Cu, Mo, V et U en fonction de conditions redox de l'environnement de dépôt. (modifié d'après Algeo et Maynard, 2004)

Par exemple, un enrichissement en *uranium* et *vanadium*, sans enrichissement en *molybdène*, indique un environnement de dépôt suboxiques à anoxiques. Par contre, des sédiments montrant un enrichissement coïncidant en *uranium*, *vanadium* et *molybdène* reflète des conditions euxiniques à l'interface eau-sédiments (Tribovillard *et al.*, 2006). Lors d'une réoxygénation des premiers centimètres de sédiments, une régénération de certains éléments est possible, en particulier l'*uranium* (Algeo et Maynard, 2004).

Durant le passage de conditions oxiques à euxiniques, le *fer* et le *manganèse* réagissent d'une façon opposée aux 3 éléments précédents (*V*, *U*, *Mo*) et montrent une diminution quasi linéaire de leur taux d'accumulation en comparaison avec l'enrichissement par paliers des éléments à affinité réductrice (cf. **Fig 8.3**). L'*arsenic* réagit de la même manière à ces conditions redox.

8.4 Résultats

Les éléments ont été préalablement groupés selon les données bibliographiques utilisées au chapitre 8.3, avant d'effectuer la description des courbes, afin d'observer une éventuelle corrélation indiquant des conditions définies préalablement. A noter que les teneurs en *iridium* n'ont pas été analysées, cette étude ayant déjà été effectuée par V. Luciani dans cette même coupe de La Spesse. Les résultats obtenus montrent une augmentation de cet élément à la limite, mais n'ont pas été publiés.

Solubilité :

La courbe du pourcentage solubilisé des échantillons montre de légères variations entre 71% et 81%, mais surtout un pic positif dans la couche argileuse (88%) qui est censée montrer plus de résidus, de par sa composition riche en argiles (cf. **Fig 8.4**). Les sédiments plus marno-argileux au-dessus de la transition dévoilent une légère baisse qui est attendue pour ces échantillons moins solubles lors de la minéralisation.

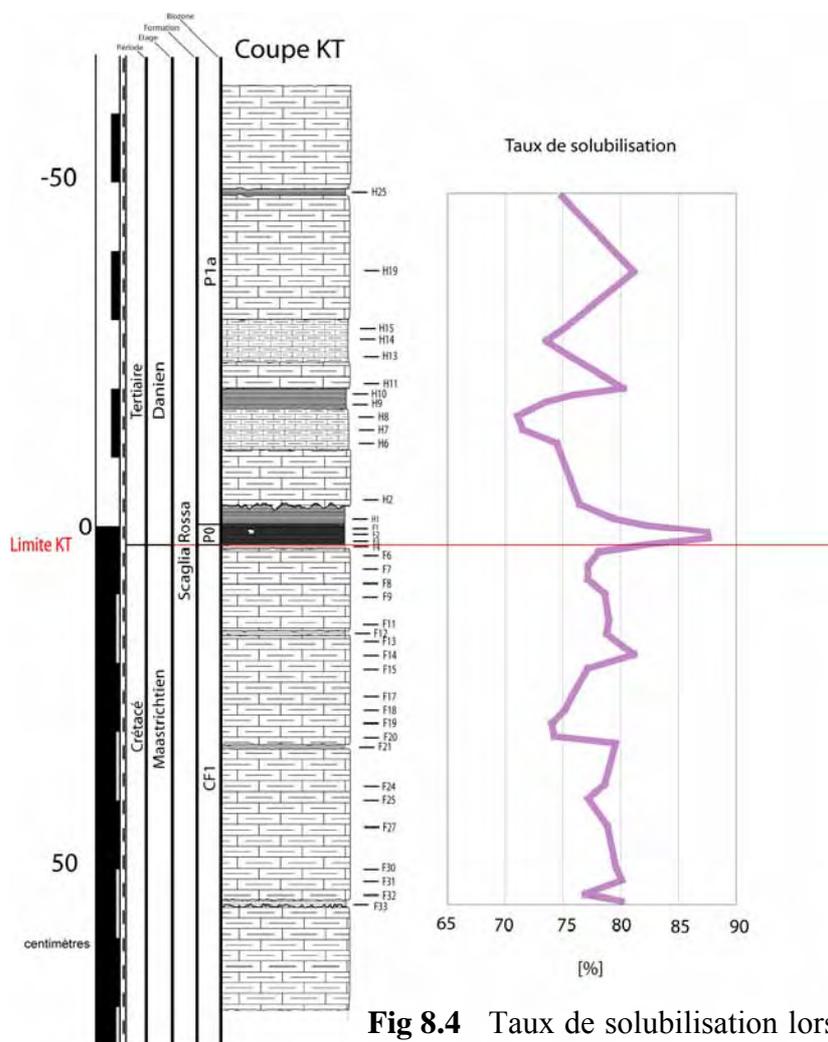


Fig 8.4 Taux de solubilisation lors de l'analyse ICP-MS.

Les sédiments analysés à la limite semblent donc être en partie les carbonates formés diagénétiquement (cf. Chapitre 8.1) et non uniquement les argiles surmontant la limite KT.

Aluminium et Potassium : Ces deux éléments possèdent des concentrations élevées et ont un comportement très similaire, confirmant ainsi leur origine identique (cf. **Fig 8.5**).

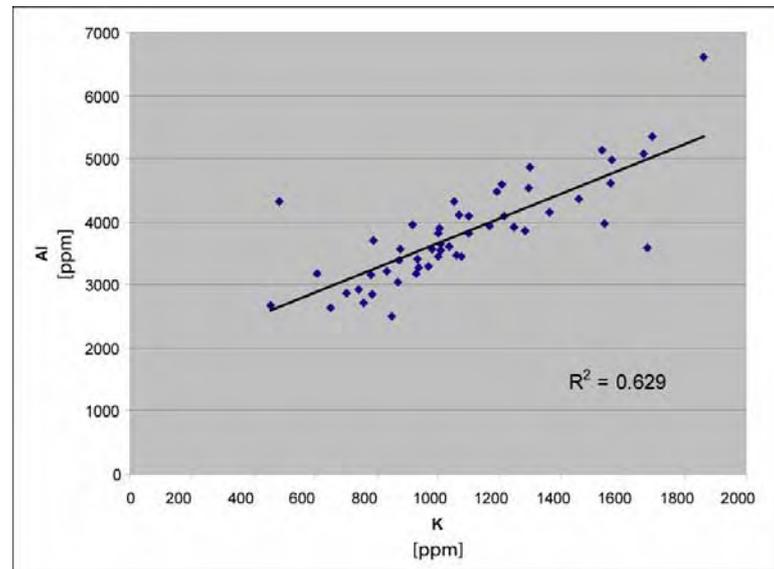
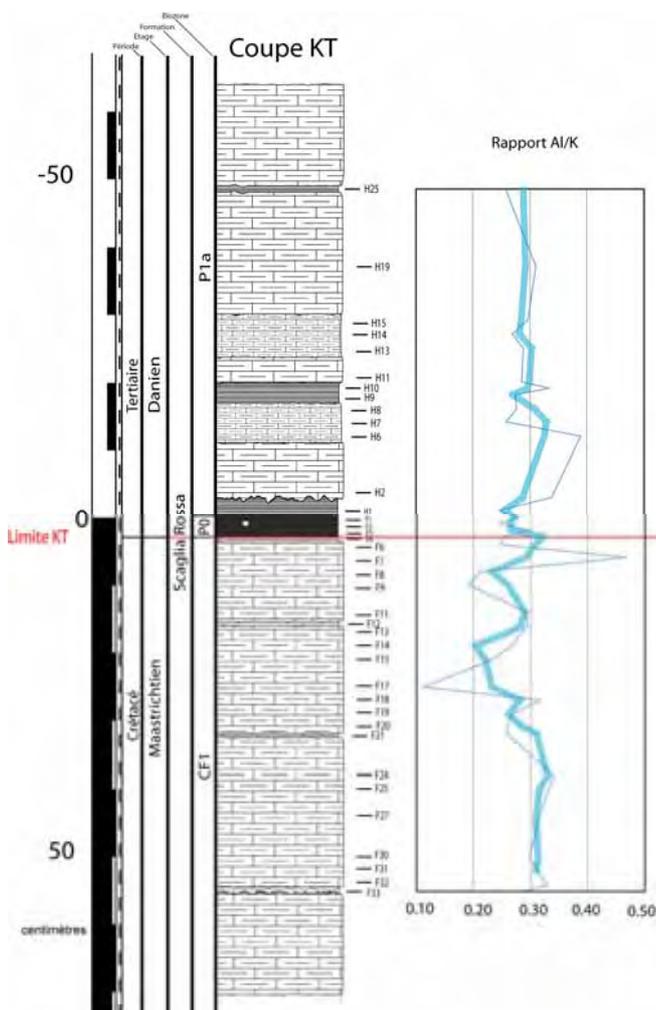


Fig 8.5 Graphique d'Al en fonction de K démontrant l'analogie du comportement de ces éléments.



La courbe est caractérisée par des variations montrant une diminution des taux d'accumulation de la base de la coupe jusque vers le début de la zone P1b (sous la transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto). Les valeurs semblent se stabiliser et réaugmenter dans les marnes d'Erto (cf. **Fig 8.7**). Autour de la limite KT, un maximum des apports détritiques est observé 40cm sous cette transition, suivi par une diminution et une chute dans la couche argileuse de la limite KT (cf. **Fig 8.8**). Une augmentation abrupte est observée dès les premiers centimètres daniens, pouvant souligner le hiatus discuté au chapitre 6 (Biostratigraphie).

Une légère diminution du rapport Al/K (cf. **Fig 8.6**) caractérise la zone P0. En observant les résultats minéralogiques à cet endroit (cf. Chapitre 7 (Minéralogie)), une diminution de la smectite (riche en Al), ainsi qu'une augmentation en micas (riche en K) sont examinées et expliquent ce comportement.

Fig 8.7 T acc. de Al et K pour la coupe de La Spesse.

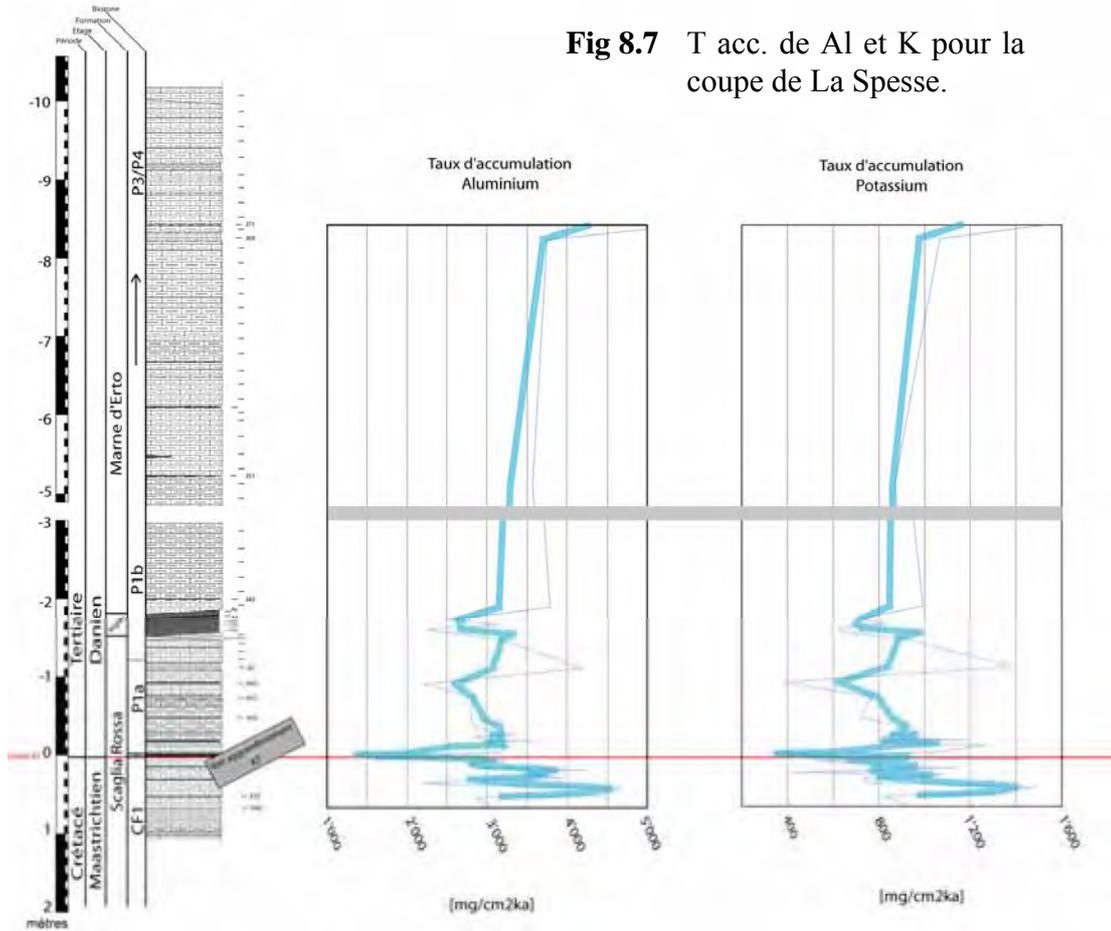
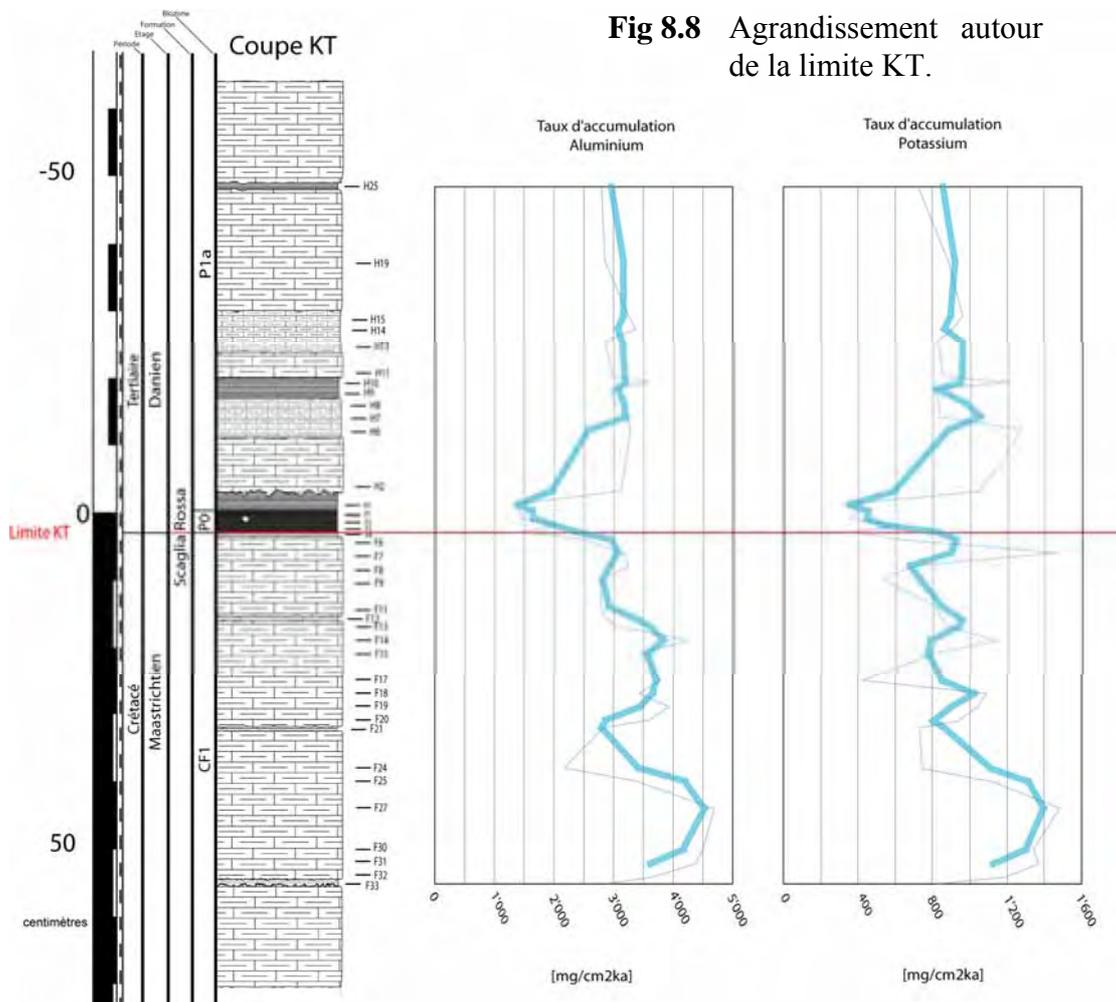


Fig 8.8 Agrandissement autour de la limite KT.



Barium :

Ba est bien présent tout au long de la coupe et montre des valeurs plus basses dans la Scaglia Rossa (~50 ppm) que dans les marnes d'Erto (~3000 ppm), qui montrent des concentrations étonnamment élevées. En observant les échantillons autour de la limite KT, une légère augmentation est observée environ 40 cm sous la transition Maastrichtien-Danien, mais celle-ci disparaît suite à la normalisation avec le potassium, marqueur des apports terrigènes (cf. **Fig.8.9**). Une origine détritique de cette hausse est donc supposée. A la limite, les concentrations doublent, indiquant une hausse de la productivité inattendue ici. En effet, la limite KT est définie par une chute du $\delta^{13}\text{C}$ et les résultats du phosphore (cf. Chapitre 10) confirment cette hypothèse. L'enrichissement observé dans la couche argileuse de la limite KT est sans doute dû à une remobilisation diagénétique, confirmé par la présence de carbonates diagénétiques (cf. Chapitre 5 (Microfaciès)).

**Cuivre, Zinc, Nickel
et Cadmium :**

Après avoir normalisé ces 4 éléments avec K afin de soustraire les apports continentaux aux résultats, une augmentation est observée vers la limite KT. Pour **Zn** et **Ni**, l'étude détaillée de la transition Maastrichtien-Danien révèle que ce pic débute une dizaine de centimètres avant la limite et se termine dans la couche argileuse P0. **Cu** et **Cd** montrent un comportement légèrement différent ; l'augmentation commence juste sous P0 et se termine dans les premiers sédiments marno-calcaires tertiaires (cf. **Fig 8.10**). Bien que moins d'échantillons aient été analysés dans les marnes d'Erto, des taux plus importants en **Cu** et **Zn** semblent caractériser cette formation tertiaire. En comparant les teneurs en **Cu**, **Zn** et **Ni** obtenues dans P0 (~60ppm, ~40ppm ~30ppm) avec les résultats de Martinez Ruiz *et al.* (1992) dans la coupe d'Agost (Espagne) (218ppm, 568ppm, 556ppm), des augmentations plus faibles semblent toujours identifiées dans la couche argileuse de la limite KT à Erto. Cependant, les sédiments autour de la limite KT ont des valeurs du même ordre de grandeur que dans la coupe située à Agost (Espagne).

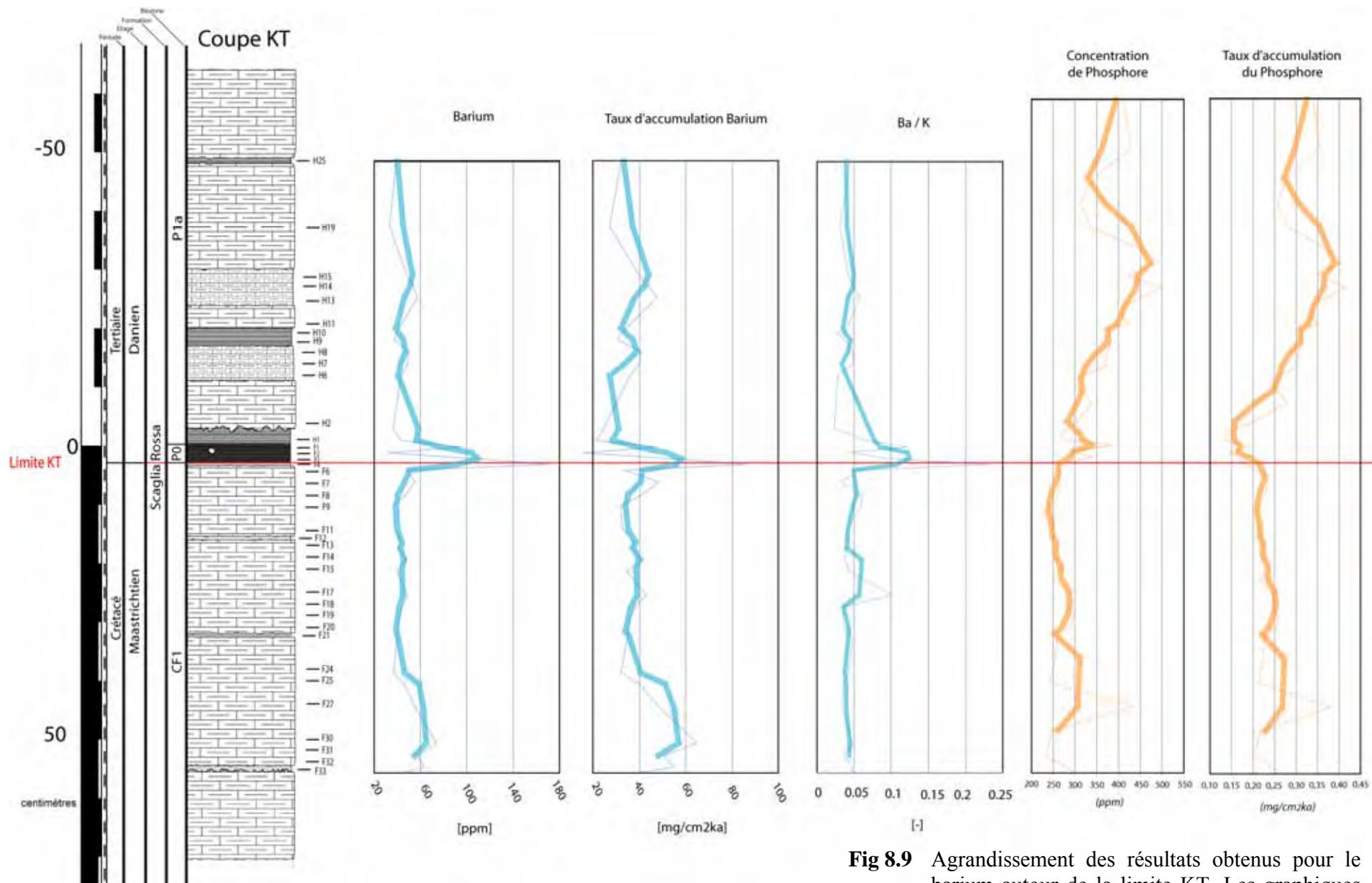


Fig 8.9 Agrandissement des résultats obtenus pour le barium autour de la limite KT. Les graphiques de phosphore ont été obtenus au chapitre 10.

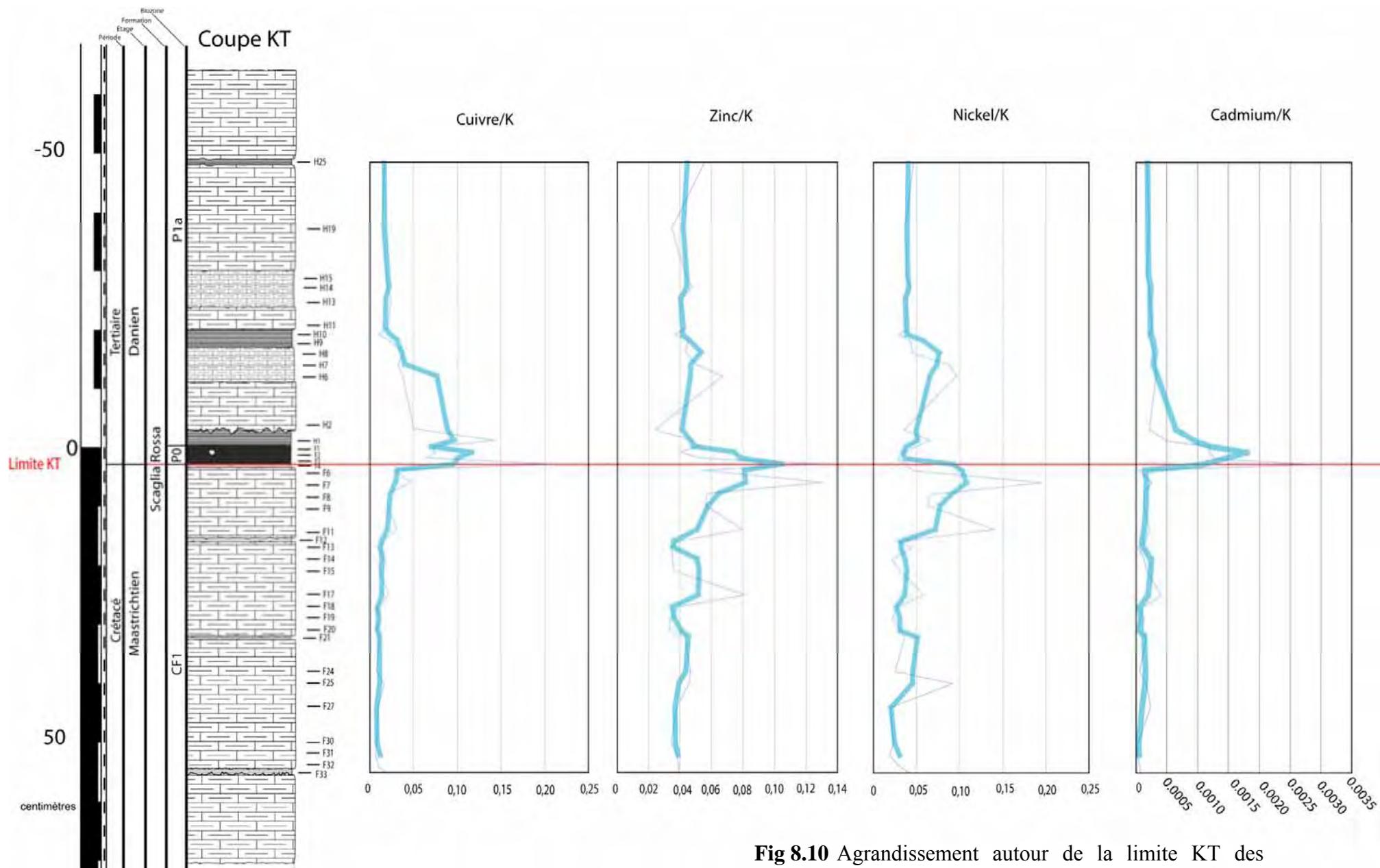


Fig 8.10 Agrandissement autour de la limite KT des teneurs en Cu, Zn, Ni et Cd, normalisées par K.

*Molybdène, Uranium
et Vanadium :*

Mo a des teneurs assez faibles (2,4 ppm en moyenne) et parfois même nulles, notamment à la base de la couche argileuse de la limite KT et dans les bancs très marneux (F12, H25, H8, H9). Les 15 derniers centimètres maastrichtiens montrent une augmentation de ses valeurs avant une chute dans la couche de la transition Maastrichtien-Danien. **V** (9,7 ppm) et **U** (0,2 ppm) semblent légèrement augmenter de la base de la coupe jusqu'aux marnes d'Erto. Des teneurs plus importantes en **V** en comparaison avec **U** et **Mo** sont souvent observé (Bodin *et al.*, 2006). Un pic important est observé aux alentours de 20 cm sous la limite pour **V**, alors que **U** montre seulement une légère augmentation. Dans la zone P0, **U** augmente de façon significative (0,4 ppm), alors que **V** montre une augmentation à peine perceptible (~10 ppm) (cf. **Fig 8.11**). Martinez Ruiz *et al.* (1992) obtiennent toujours des concentrations plus importantes. En effet, **U** montre un pic de 23,4 ppm et **V** une augmentation jusqu'à 271 ppm dans la zone P0.

Fer et Manganèse :

Ces 2 éléments ne montrent pas exactement le même comportement, mais les pics principaux sont bien corrélables. **Mn** augmente de la base de la coupe jusqu'aux marnes d'Erto avant de se stabiliser, alors que **Fe** diminue jusqu'au sommet du Maastrichtien, avant d'augmenter également jusqu'au sommet de la formation de la Scaglia Rossa (cf. **Fig 8.12**). Autour de la limite, un maximum est remarqué dans les 2 cas pour l'échantillon H1, situé juste au dessus de la couche argileuse P0. Les valeurs montrent ensuite une tendance positive pour les deux éléments dans les sédiments tertiaires (cf. **Fig 8.13**). Les valeurs augmentent rapidement pour **Fe**, alors que les teneurs en **Mn** semblent croître d'une façon plus graduelle.

Cobalt, Arsenic et Plomb :

Co et **Pb** montrent un comportement assez similaire et des teneurs importantes entre 30 cm avant et 20 cm après la limite KT. Un pic est observé environ 20 cm sous la transition. La couche argileuse de la limite KT montre une concentration très importante en **As** (5,7ppm), alors que les sédiments alentours sont très pauvres en cet élément (<1ppm) (cf. **Fig 8.14**). L'étude de Martinez ruiz *et al.* (1992) révèle des teneurs extrêmement plus élevées en **As** dans la couche argileuse de la limite (380ppm) ainsi qu'autour de celle-ci (<10ppm). Des valeurs importantes en **As** sont observées dans les marnes d'Erto.

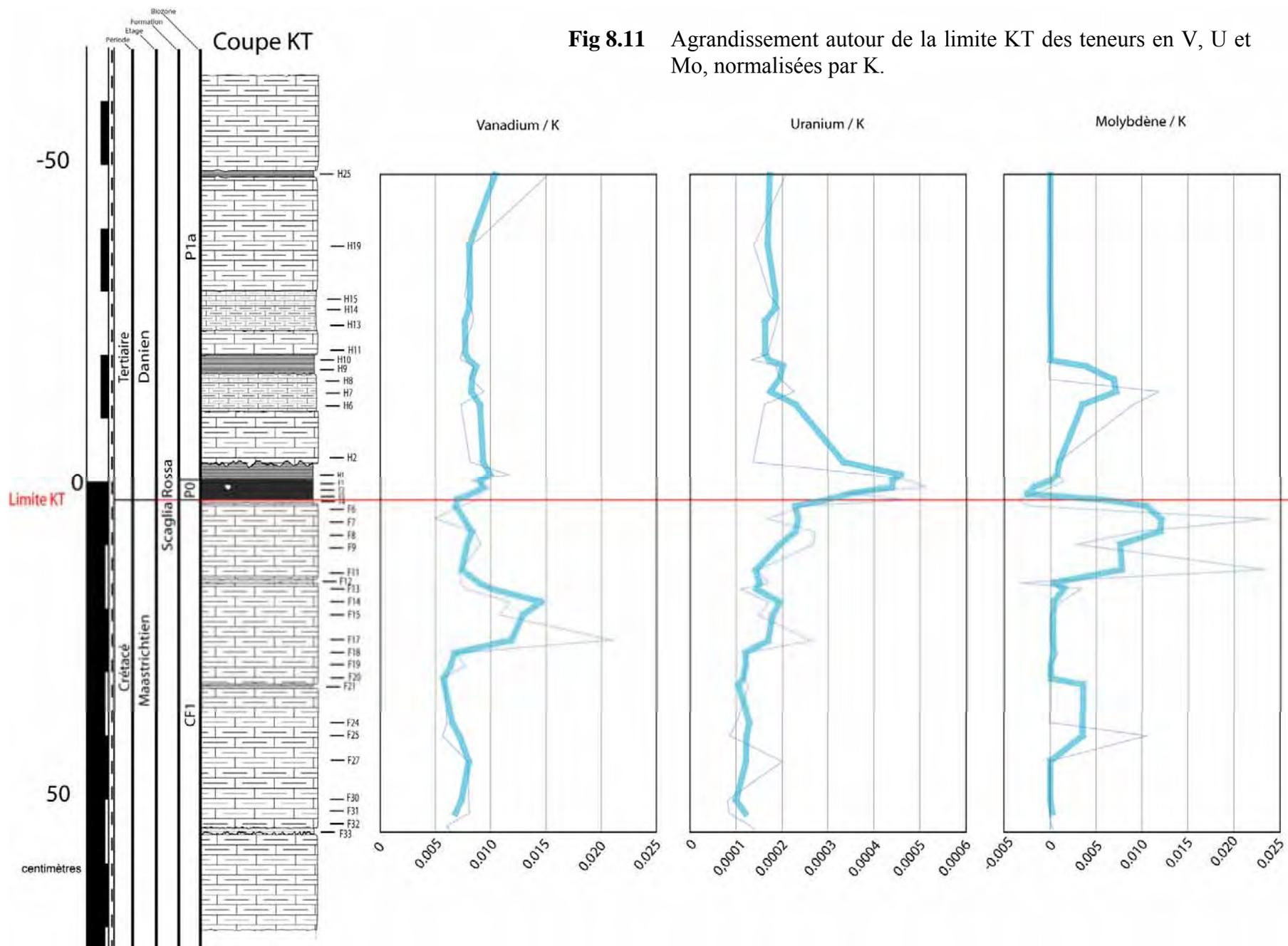


Fig 8.11 Agrandissement autour de la limite KT des teneurs en V, U et Mo, normalisées par K.

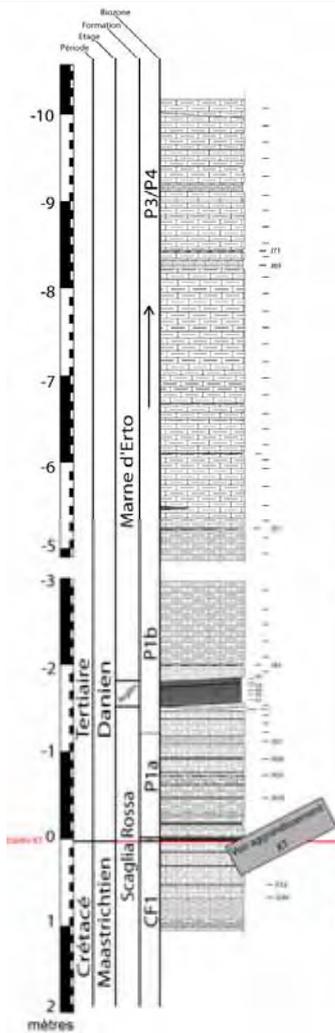


Fig 8.12 Teneurs en Fe et Mn, normalisées par K pour l'ensemble de la coupe de La Spesse.

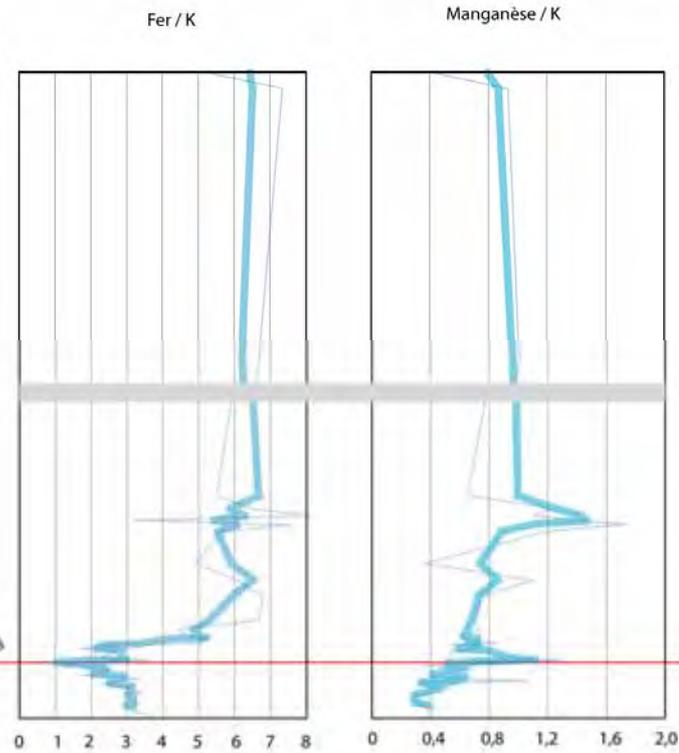
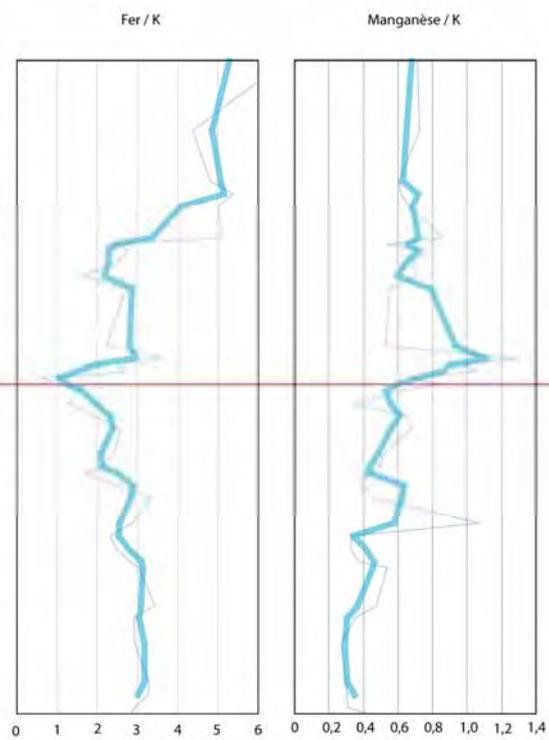
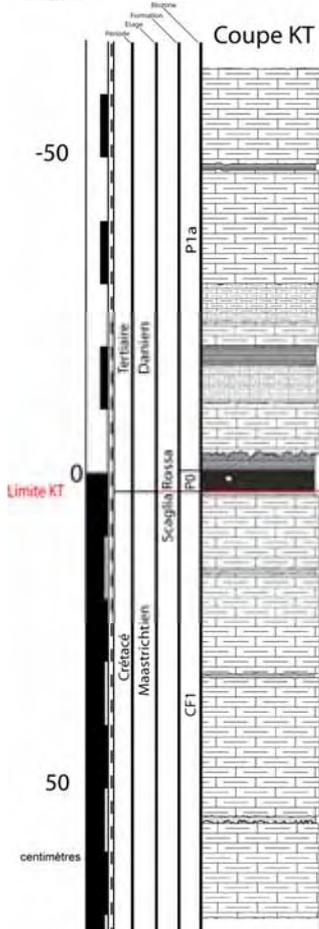


Fig 8.13 Agrandissement autour de la limite KT des teneurs en Fe et Mn, normalisées par K.



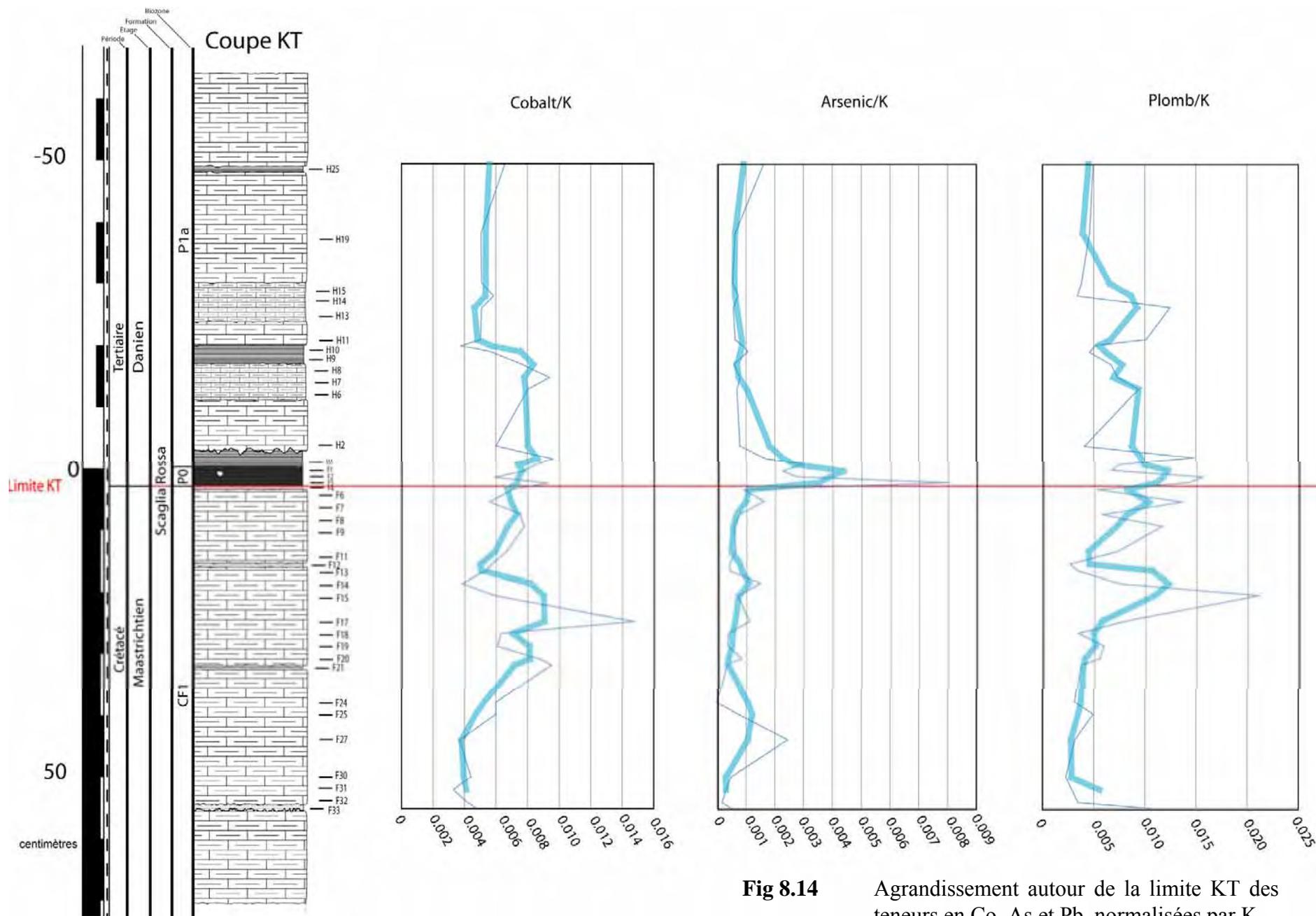


Fig 8.14 Agrandissement autour de la limite KT des teneurs en Co, As et Pb, normalisées par K.

8.5 Analyse statistique

Afin de regrouper les différents éléments partageant des informations similaires dans le système géochimique et non les éléments indiquant des conditions similaires, une étude statistique fondée sur l'analyse en composantes principales a été réalisée pour traiter les résultats. Une matrice de corrélation a été calculée à partir des valeurs normalisées avec K de 38 échantillons autour de la limite KT (H25 à F33) (cf. **Fig 8.15**). Le programme « Matlab » a été utilisé pour les calculs et la réalisation des figures concernant ces différents éléments (**V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, U**). Le détail des manipulations se trouve en annexes 2.4.2.

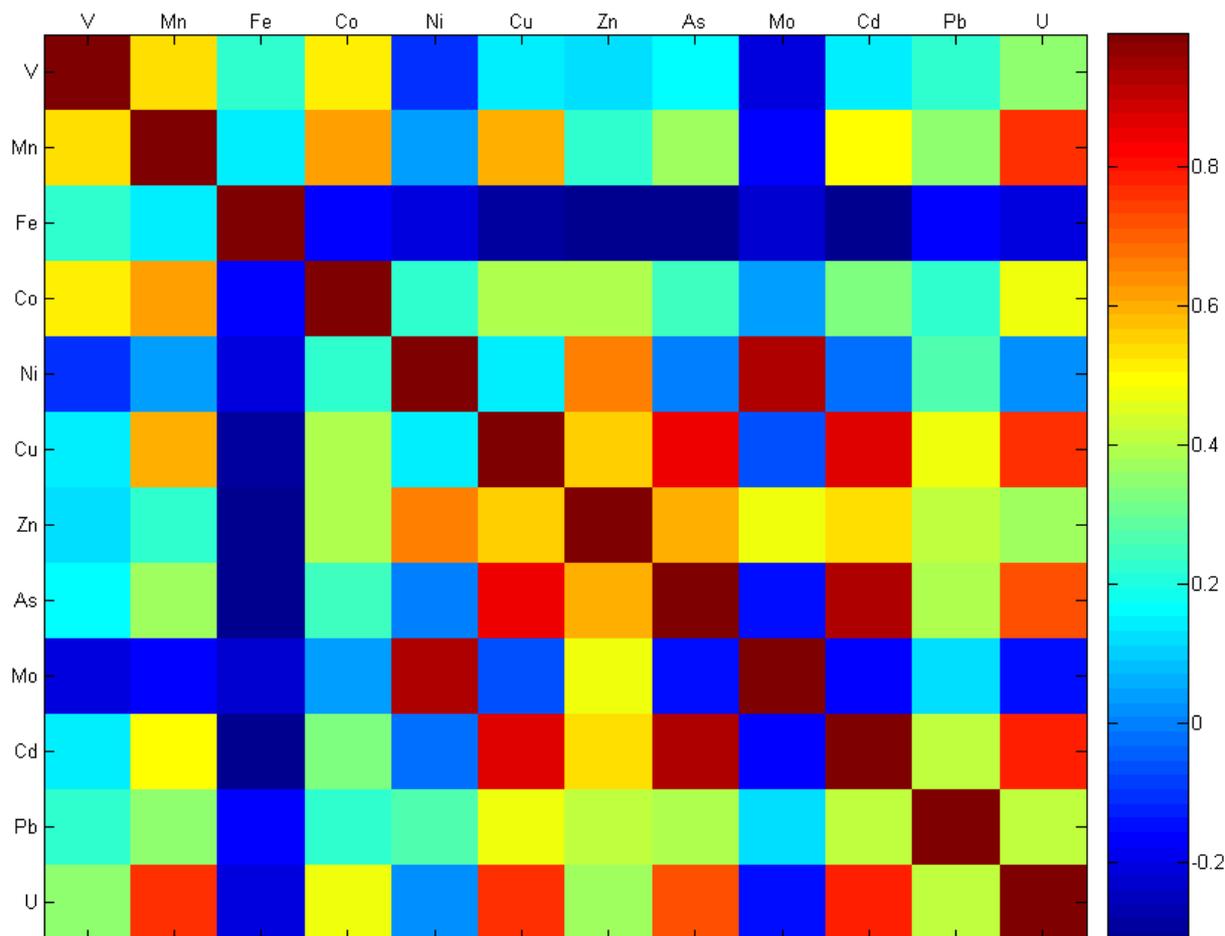


Fig 8.15 Figure de la matrice de corrélation illustrant les affinités entre les éléments étudiés selon un code couleur. Le coefficient de corrélation est exprimé sur l'échelle à droite de la figure ; 1 indiquant une corrélation parfaite.

L'analyse visuelle de cette matrice indique que Ni et Mo ont une forte corrélation. Des corrélations significatives sont également observées pour **As, Cd, Cu** et **U**. Enfin, **U** est aussi corrélé à **Mn**.

La création d'axes orthogonaux entre eux traversant le nuage de points permet de mieux se représenter la distribution des points et de simplifier l'information en sélectionnant les axes portant le maximum de variance. Une matrice de corrélation illustrant les relations entre les variables (éléments) et leur poids sur les axes de l'ACP (composantes principales) est également réalisée (cf. **Fig 8.16**).

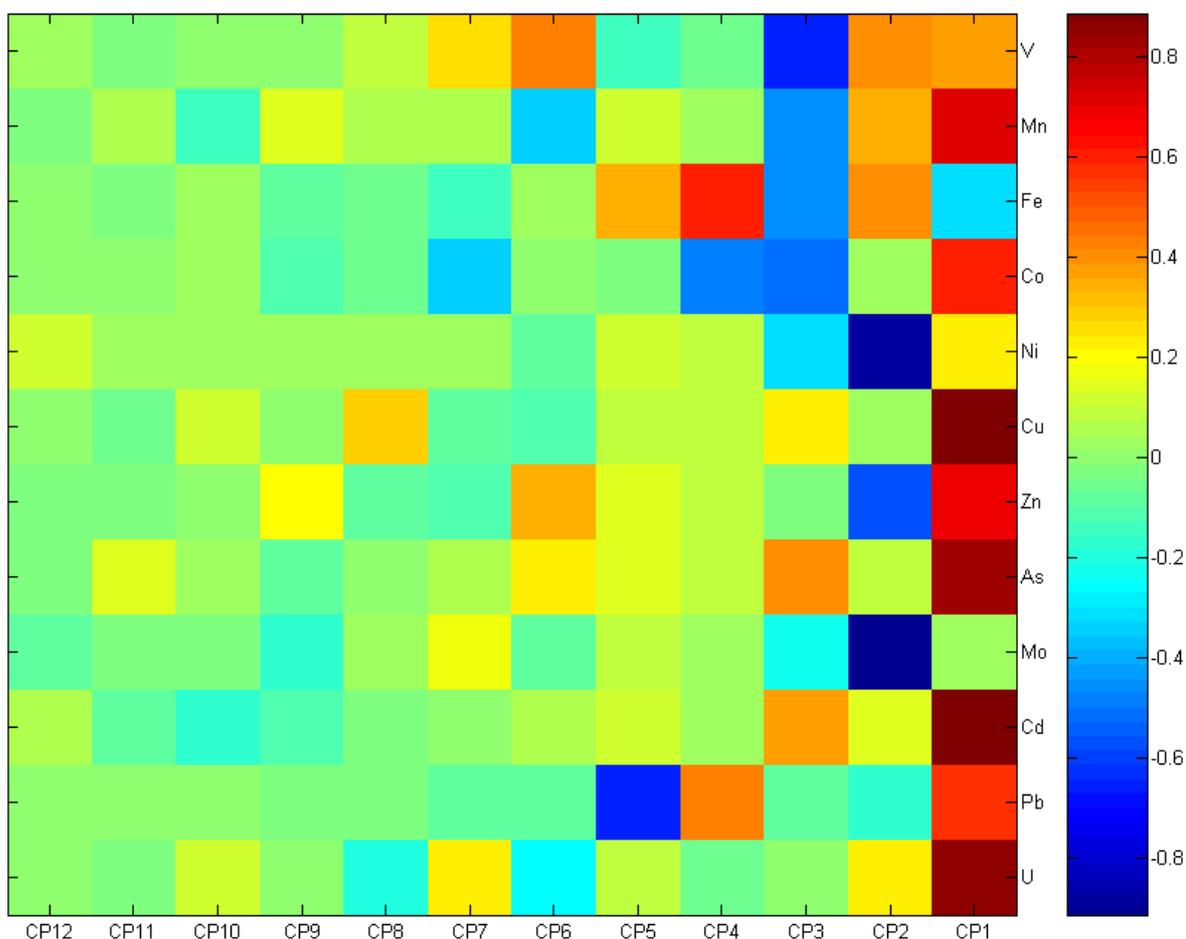


Fig 8.16 Figure illustrant les différentes composantes principales et leur corrélation avec les éléments étudiés selon un code couleur.

Ces composantes principales permettent de mettre en évidence des associations entre les éléments qui participent à la création des mêmes axes. La composante principale 1 (CP1) est chargée positivement par **As**, **Cd**, **Cu** et **U** de manière positive (rouge). CP2 exprime le comportement de **Mo** et **Ni**, mais de manière négative (bleu). **V** participe à la création de CP3 de manière négative. Le comportement de **Fe** (positif) et éventuellement de **Co** (négatif) semble participer faiblement à la création de CP4 (seulement 6,9% de la variance).

En calculant le pourcentage de variance exprimé par chaque composante principale, on remarque que 76,5 % de la variance totale du système est exprimée par les 3 premières composantes (cf. **Fig 8.17**). Un bon cas de figure est d'obtenir plus de 75% de la variance totale sur les 3 premiers axes (Verrechia, 2004).

%Var cum	CP	
41,9	CP1	76,5 % Variance expliquée
63,0	CP2	
76,5	CP3	
83,4	CP4	
89,0	CP5	
93,7	CP6	
96,5	CP7	
97,8	CP8	
98,9	CP9	
99,5	CP10	
99,8	CP11	
100,0	CP12	

Fig 8.17 Cumul du pourcentage de variance expliquée par chaque composante.

La réalisation de cercles de corrélation a permis d'obtenir une vision dans l'espace de ces composantes et d'isoler plusieurs groupes d'éléments selon leur relation à CP1, CP 2 et CP3 (cf. Fig 8.18, 8.19 et 8.20).

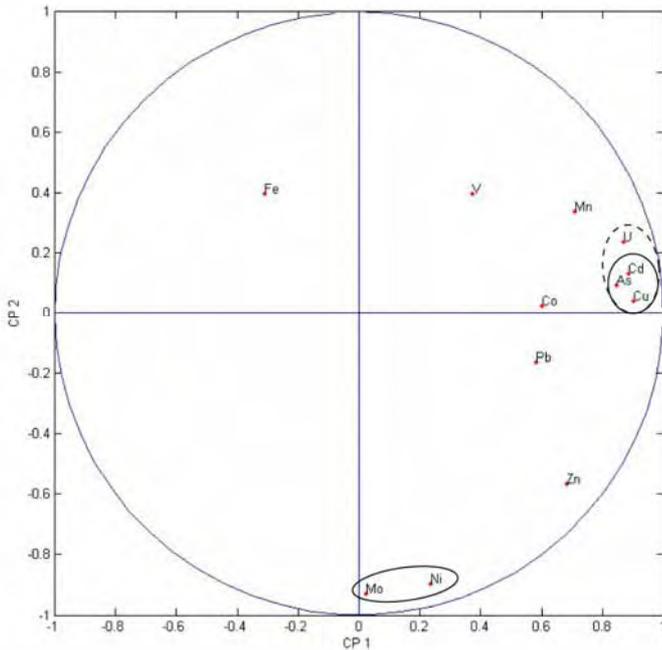


Fig 8.18 Cercle de corrélation selon CP1 et CP2.

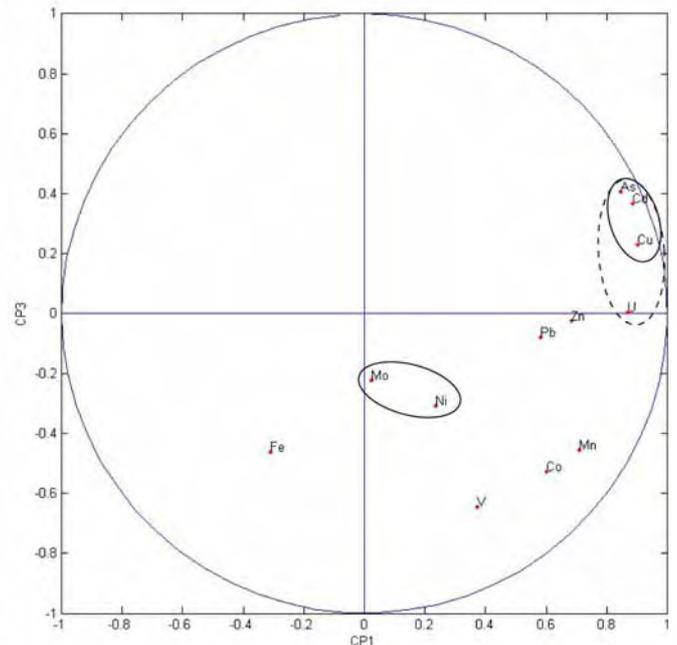


Fig 8.19 Cercle de corrélation selon CP1 et CP3.

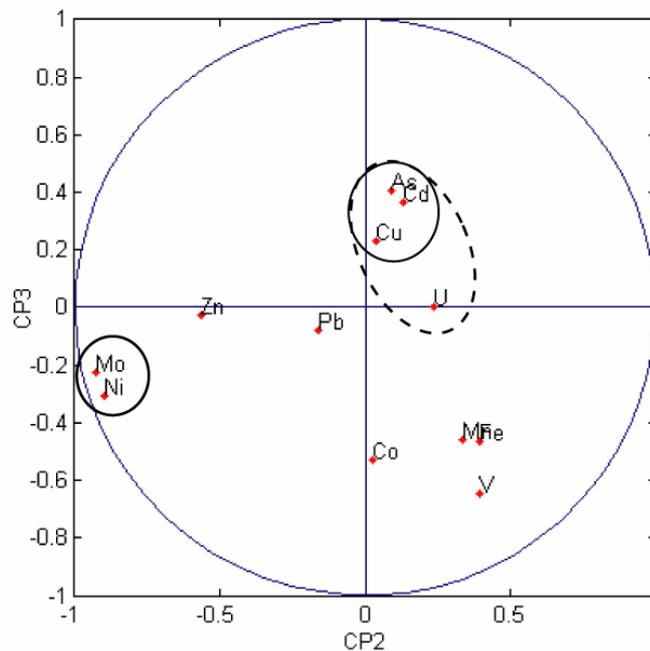


Fig 8.20 Cercle de corrélation selon CP2 et CP3.

- **As, Cd et Cu** sont toujours très proches et **U** montre également une affinité pour ces éléments. Ce groupe caractérise CP1. **Co, Mn, Pb et Zn** ont également un certain poids sur cette composante principale.
- **Mo et Ni** sont regroupés dans tous les cercles et expriment négativement CP1.
- **Fe** semble isolé sur CP1.

Les échantillons sont maintenant placés dans un graphe qui permet de voir comment les échantillons se distribuent selon chaque composante (CP1, CP2 et CP3) (cf. Fig 8.21 et 8.22).

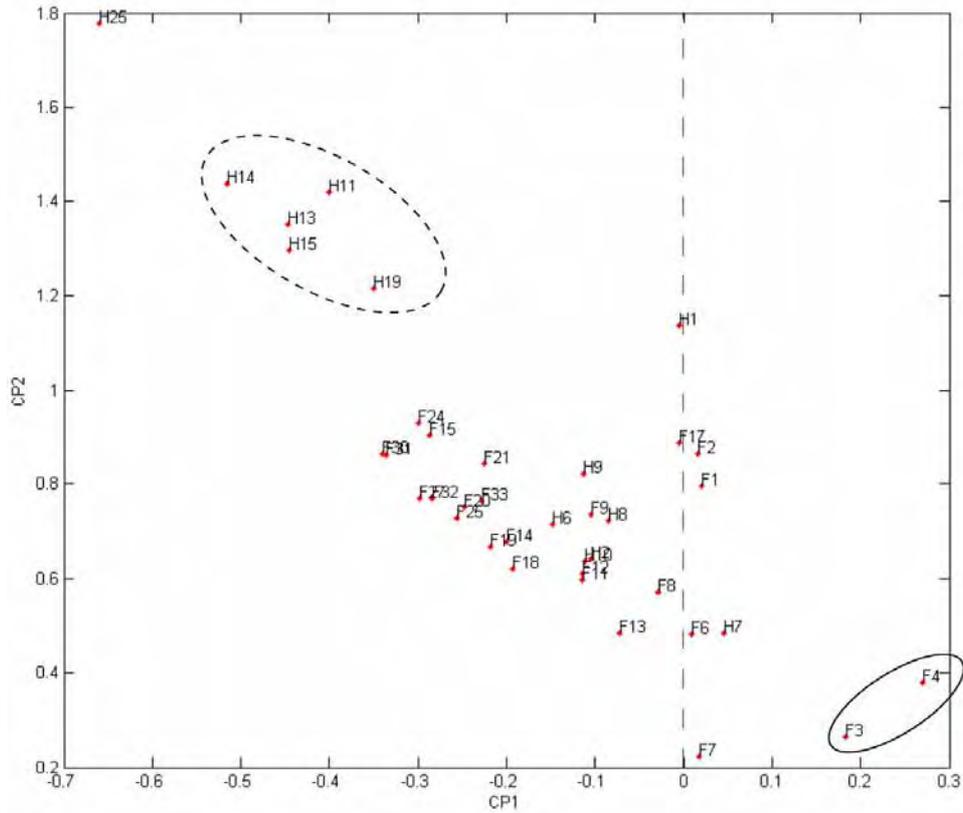


Fig 8.21 Echantillons exprimés selon CP1 et CP2.

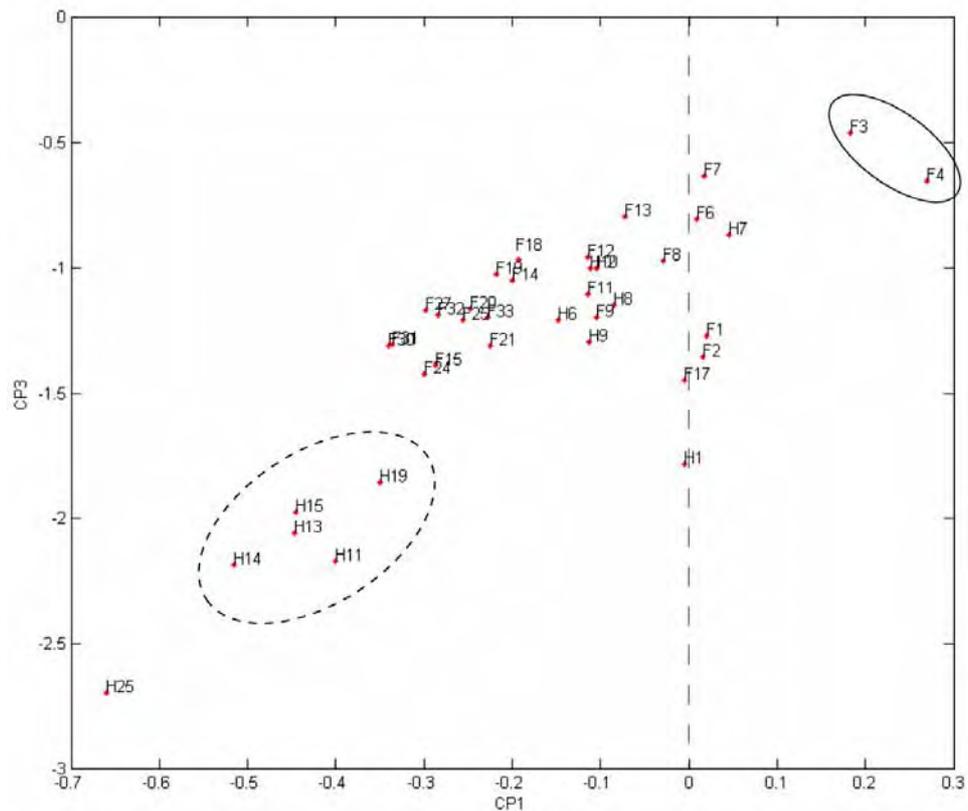


Fig 8.22 Echantillons exprimés selon CP1 et CP3.

Les échantillons F3 et F4 (dans la couche argileuse de la limite) semble le mieux exprimer la composante 1 (**Cu, Cd, As, U**) (cf. **Fig 8.18** et **8.19**). Cette observation est assez logique puisque ces éléments sont caractérisés par un pic important à la limite KT. CP1 semble donc être caractérisé par les argiles de la limite KT. Les échantillons H11 à H25 forment le sommet de la coupe étudiée et semble caractériser CP2 positivement et CP3 négativement. Les valeurs observées en **Ni** pour ces échantillons sont très stables et ne montrent que peu de variations, alors que les teneurs en **Mo** sont mêmes nulles. Les composantes principales indiquent donc que ce groupe d'échantillons est pauvre en **Mo** et **Ni** (CP2), ainsi qu'en **As, Cd, Cu** et **U** (CP1), alors que les teneurs en **V** semblent plus importantes (CP3).

Grâce à cette analyse statistique et à l'observation des courbes, 4 groupes principaux peuvent être définis :

- I : **Mo, Ni** qui sont très semblables et montrent des valeurs importantes qui débutent 15 cm sous la limite KT (2 pics importants) et se terminent à la base de la couche argileuse. Un pic important est également observé 40 cm sous la limite. La courbe de **Cr** n'a pas été intégrée dans l'étude statistique, mais elle possède exactement les mêmes caractéristiques.
- II : **As, Cd, Cu** et **U** qui montre une augmentation dans la couche argileuse de la limite KT. Le pic de **Cu** se prolonge plus loin dans le Danien et montre donc un comportement légèrement différent, sans doute dû à la diagenèse.
- III : **V** et **Co** qui ont un maximum environ 20 cm sous la limite KT. **U** montre également une légère augmentation à cet endroit, mais le pic à la limite est bien plus important que pour ces trois éléments, c'est pourquoi cet élément est classé dans le groupe II.
- IV : **Pb** et **Zn** qui possèdent trois pics importants respectivement à environ 20, 10 et 5 cm sous la limite, ainsi qu'une dernière augmentation à la limite.

8.6 Interprétations

L'augmentation de plusieurs éléments comme **As, Ba, Fe, Mn, U, Cu, Zn, Cd** et **Pb** semble caractériser les sédiments à la limite KT. Cependant, la diagenèse semble avoir affecté la couche argileuse surmontant cette transition. Ces argiles montrent un taux de solubilisation anormalement élevé (cf. **Fig 8.4**), confirmant la présence de carbonates diagénétiques observés en lame mince. Tous ces résultats doivent donc être interprétés avec précaution, car l'allure des courbes de certains éléments (**As, Ba, Cd, Cu**) montre un aplatissement des pics et semble indiquer une remobilisation diagénétique vers la limite. En comparaison avec **P**, l'accumulation importante de **Ba** observée dans la couche argileuse est interprétée comme une remobilisation de cet élément lors de la diagenèse.

En comparant les résultats obtenus dans la coupe de La Spesse avec les résultats de Martinez Ruiz *et al.* (1992) obtenus à Agost (Espagne), des teneurs (ppm) légèrement plus faibles sont souvent observées à Erto dans les sédiments autour de la limite KT, alors que les augmentations de certains éléments à la limite (**As, Cu, Zn, U**) sont toujours moins marquées. Cette différence peut être expliquée par le fait que la couche argileuse située à Agost possède des concrétions de goethite et de glauconie.

Les augmentations remarquées avant la limite (**Zn, Ni, Mo, Mn, Cr, Co, Pb**) pourrait indiquer des apports élevés dus au volcanisme du Deccan (Snow *et al.*, 2005 ; Martinez Ruiz *et al.*, 1992). Une intensification de l'altération continentale due aux pluies acides à la suite de ce volcanisme peut également être envisagée.

La présence de matière organique dans les dépôts de la fin du Maastrichtien peut également expliquer une partie de ces apports dans le Crétacé terminal. En effet, **Zn** et **Ni** sont des marqueurs de la présence de MO, même si celle-ci a disparue après la sédimentation, suite à la diagenèse. De plus, le principal mécanisme de sédimentation de **Mo** est l'adsorption sur des substances humiques (Algeo et Maynard, 2004) et une augmentation de cet élément est également observée sous la limite KT.

Co, Ni et **Cr**, sont considérés, tout comme **Ir** (non étudié dans le présent travail), comme étant des éléments d'origine extraterrestre (Martinez Ruiz *et al.*, 2002). Les augmentations observées autour de la limite pourraient peut-être provenir de l'impact *pré* KT (Keller *et al.*, 2004). Malheureusement, aucun enrichissement n'est observé à la limite, pourtant également caractérisé par un impact. La distribution de ces éléments dans la coupe de La Spesse ne semble donc pas liée aux météorites pourtant connues à cette époque.

L'hydrothermalisme pourrait expliquer l'augmentation en **Mn, Pb, Zn** et **Ba** avant la limite, mais cela ne semble pas approprié vu la position paléogéographique du lieu d'étude (cf. Chapitre 2 (Situation)).

Les marqueurs des conditions redox semblent indiquer des conditions locales plus anoxiques 20 cm sous la limite (F17). En effet, **V** et **U** montrent un pic positif alors que les teneurs en **Mo** sont nulles. Une augmentation en **Zn, Ni, Co, Mn** et **Pb** est également observée à cet endroit.

Juste sous la limite, une augmentation en **Mo** est observée, alors qu'une chute des teneurs se situe dans la couche argileuse de la limite KT. Par contre, **U** montre un pic positif important dans ces argiles et **V** augmente légèrement. Ces différentes variations sont difficilement corrélables, mais semblent indiquer des conditions réductrices à la limite. De plus, la concentration importante de certains éléments tels que l'**As** peut dévoiler le passage à un milieu plus anoxique dans la couche argileuse de la limite KT ; son dépôt étant facilité sous

ces conditions (Bostick et Fendorf, 2003). L'étude de P (cf. Chapitre 10 (Phosphore)) indique également une chute de la productivité à la limite due à la mortalité en masse des microorganismes. Cet apport important de MO peut influencer les conditions redox et installer des conditions anoxiques.

Aucun indice d'un environnement de dépôt euxinique n'a été remarqué dans la coupe de La Spesse. Les faibles teneurs en **Mo** tout au long de la coupe (parfois nulles) semblent appuyer cette hypothèse.

Une augmentation en **Pb** et **Co** ~20 cm sous la limite KT semble caractériser les dépôts du Maastrichtien terminal. En effet, Martinez Ruiz *et al.* (2002) ont déjà observé le même comportement dans un site ODP (ODP Leg 171B). Une augmentation en **Ni** et **Cu** est également observé dans ce même projet, mais est moins importante dans la coupe de La Spesse. Le pic en **Fe** et **Mn** au sommet de la couche argileuse remarqué à Erto peut aussi être corrélé aux résultats obtenus dans l'étude de Martinez Ruiz *et al.* (2002), de même que l'augmentation en **U** à la limite KT.

Le groupe II (**As, Cd, Cu, U**) obtenu grâce à l'analyse statistique est caractérisé par un pic dans la zone P0. Comme **As, Cd** et **Cu** (**Zn** aussi) sont très facilement adsorbés sur les minéraux argileux (Stüben *et al.*, 2002) une augmentation des teneurs dans cette couche riche en phyllosilicates semble logique.

L'interprétation des associations obtenues grâce à l'analyse statistique reste très difficile. En effet, peu de publications traitent ces éléments selon les 4 groupes qui ont été définis ([**Mo, Ni, (Cr)**] ; [**As, Cd, Cu, U**] ; [**Co, V**] ; [**Pb, Zn**]). De plus, la nature des transformations diagénétiques de la couche argileuse de la limite KT et la mobilité des éléments traces ne facilite pas les explications.

Les nombreuses variations observées dans les graphiques de la totalité des éléments semblent s'arrêter au niveau d'une couche plus marneuse 20 cm au-dessus de la limite KT (H9-H10). Cette frontière pourrait représenter la limite de mobilité des métaux traces enrichis à la limite KT ou le retour à des conditions plus stables après les bouleversements observés autour de la limite KT.

Enfin, les différentes augmentations d'éléments durant le Maastrichtien ne sont pas toujours profitables à la vie océanique et peuvent contribuer à la croissance du stress à l'approche de la limite KT et même être toxiques pour certains organismes qui seraient moins tolérants vis-à-vis de ces changements.

CHAPITRE 9

MATIÈRE ORGANIQUE

9.1 Méthode

La détermination de la matière organique est obtenue en utilisant la méthode par pyrolyse Rock-Eval, développée par l'Institut français du pétrole. Les analyses ont été réalisées durant le mois de novembre 2005 sur la machine Rock-Eval 6 de l'Université de Neuchâtel.

63 échantillons, répartis entre G44 et J80 et préalablement réduit en poudre, sont chauffés par paliers dans un four de pyrolyse et dans un four d'oxydation selon un programme défini de montée en température. Cette manipulation se déroule donc en deux phases :

- Tout d'abord, dans un four de pyrolyse sous atmosphère inerte (hélium), les effluents sont analysés en continu par un détecteur à ionisation de flamme (FID) pour les hydrocarbures dégagés et par une cellule infrarouge (IR) pour le CO₂ formé durant le processus. La courbe de dégagement des hydrocarbures est issue de la vaporisation et du craquage de la matière organique. Les courbes CO et CO₂ correspondent au craquage des fonctions oxygénées de la matière organique (kérogène) et à la décomposition partielle des carbonates.
- Puis, dans un four d'oxydation sous atmosphère oxydante, le CO₂ formé durant l'oxydation du carbone organique résiduel et de la décomposition des carbonates est analysée en continu par la cellule infrarouge (IR).

La calibration des résultats est réalisée par rapport au standard n° 160000 de l'Institut français du pétrole qui correspond à des argiles liasiques du bassin de Paris. Le standard VP143h, qui est un standard interne du laboratoire GEA de l'Université de Neuchâtel correspondant à l'étude de la limite Cénomanién-Turonien à Vergons et Cassis (France) (Rais, 2001), est également utilisé.

Ces analyses permettent de déterminer la température maximale du signal FID (T_{max}) et de quantifier le carbone organique total (TOC). Les indices d'hydrogène (HI) et d'oxygène (OI) sont également examinés et permettent une classification de l'origine de la matière organique grâce au diagramme d'Espitalié (diagramme HI-OI). T_{max} est utilisé pour comparer les échantillons entre eux et établir des échelles de maturations des roches mères. La teneur en carbone organique total (% pondéral) est la somme du carbone organique résiduel et du carbone organique pyrolysé.

Pour plus de détails sur ces manipulations, voir l'annexe 2.3.

9.2 Résultats

9.2.1 Carbone organique total (TOC)

Les valeurs du TOC sont très basses et varient entre 0,01% et 0,42% (moyenne de 0,06%) pour l'ensemble de la coupe. De ce fait, seul le carbone minéral (MinC) peut être pris comme valeur fiable. Le rapport Redfield (C/N/P → 106/16/1) est donc malheureusement inutilisable, la teneur en carbone organique étant égale à 0.

La création d'un diagramme d'Espitalié permettrait de définir l'origine de la matière organique en comparant l'index oxygène (OI) avec celui d'hydrogène (HI). Ce graphique est divisé en trois zones qui définissent chacune une origine pour la matière organique (Espitalié *et al.*, 1985). Malheureusement, les échantillons présentant une valeur de TOC inférieure à 0.75% ne peuvent pas être utilisés pour réaliser le diagramme (condition de validation de la méthode d'Espitalié). Comme l'atteste les OI très haut et les HI presque tous égaux à 0, la matière organique a été oxydée. Le calcul de Tmax, qui est un excellent indicateur de la maturité de la matière organique, est également impossible par manque de MO.

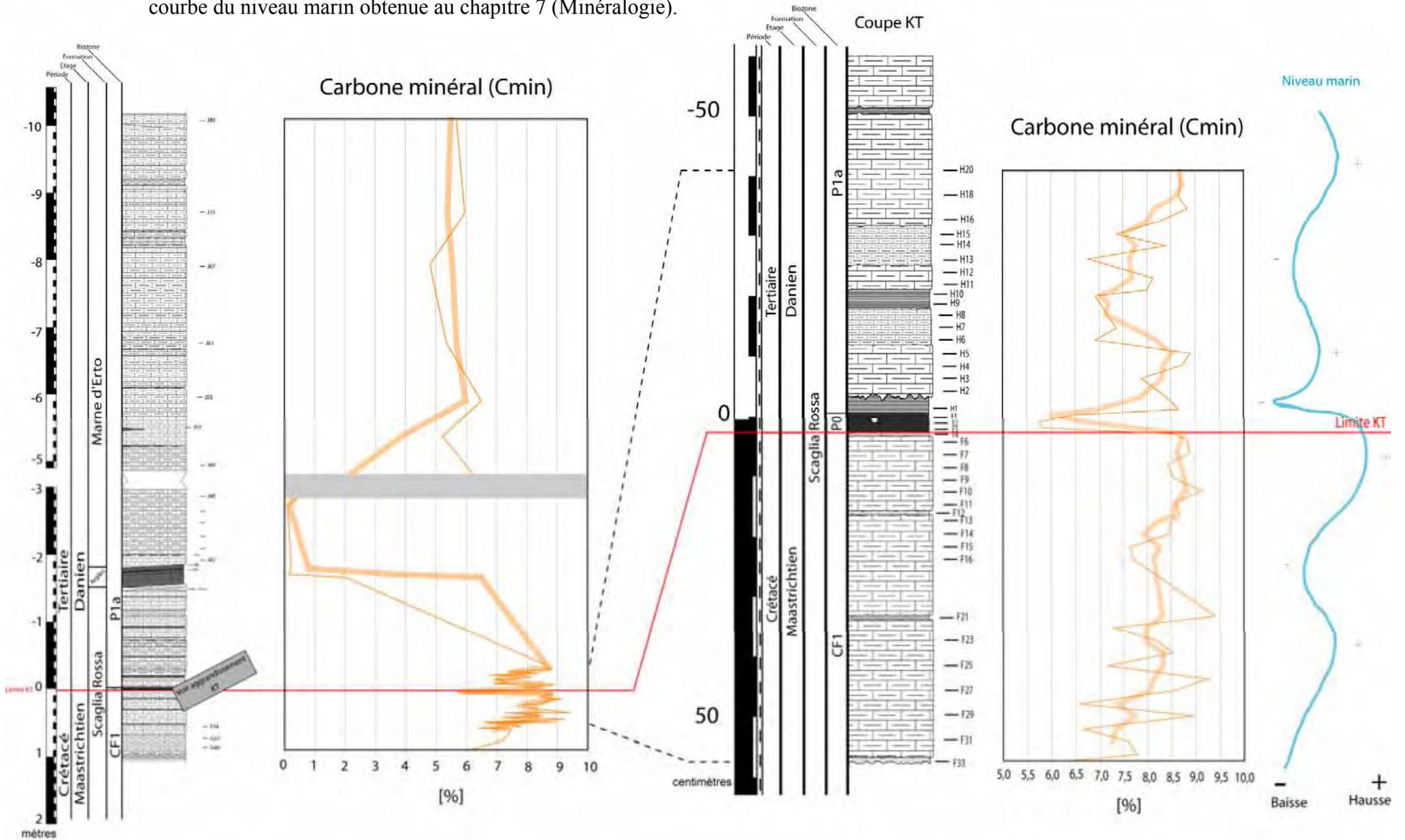
9.2.2 Carbone minéral (MinC)

Les valeurs pour la courbe du carbone minéral tout au long de la coupe de La Spesse varient entre 0,11% et 9,42%, pour une moyenne de 7,1%. De faibles pourcentages sont observés dans la couche de transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (A5, A6), ainsi que dans les deux échantillons surmontant cette couche argileuse (J42, J48).

En étudiant l'agrandissement à la limite KT, des pourcentages entre 5,7% et 9,4% sont observés. En décrivant la courbe, une augmentation des teneurs est observée depuis l'échantillon F33 jusqu'à la limite KT. La couche argileuse de la limite KT montre une diminution des valeurs qui est à nouveau suivie d'une augmentation, dès l'échantillon H1 et jusqu'à H5. Une légère diminution est observée entre H5 et H10, qui est suivie par une augmentation des valeurs jusqu'à H20 (cf. **Fig 9.1**).

Dans l'agrandissement KT, les teneurs en MinC montrent des fluctuations avec des chutes rapides des pourcentages et des augmentations qui semblent s'effectuer sur un intervalle plus important. Les tendances de cette courbe semblent identiques à l'approximation du niveau marin obtenue au chapitre 7 (Minéralogie).

Fig 9.1 Courbe montrant les valeurs du carbone minéral ainsi que la courbe du niveau marin obtenue au chapitre 7 (Minéralogie).



9.3 Interprétations

Les sédiments constituant la coupe de La Spesse ne contiennent quasiment pas de matière organique (MO). Le lieu d'étude ayant été affecté par l'orogénèse des Alpes du Sud (cf. Chapitre 2 (Situation)), la dégradation de la matière organique est envisageable. En effet, si l'enfouissement dépasse 4000 mètres, tout est « cuit » et les pétroles, huiles et gaz, sont détruits (Bourque, 1997). Cette absence de MO peut également indiquer une bonne oxygénation du milieu de dépôt. En effet, en présence d'oxygène, celle-ci est dégradée, directement ou grâce à des microorganismes. La conservation de la MO dans les sédiments dépend cependant de plusieurs facteurs (Cojant et Renard, 1999) :

- La *profondeur du dépôt* ; du fait d'une oxydation progressive dans le sédiment, le flux de MO décroît avec la profondeur.
- La *granulométrie du sédiment*, grâce à la perméabilité et la porosité, permet des échanges entre l'eau de mer et les eaux interstitielles qui maintiennent une oxygénation favorisant la destruction de la MO dans les sédiments grossiers.
- Le *taux de sédimentation*, qui permet de soustraire la matière organique aux conditions oxiques favorables à sa destruction par un enfouissement rapide.
- Les *conditions d'oxydo-réduction* ; la présence d'eaux anoxiques sur le fond favorise la conservation de la MO.
- La *production primaire* ; plus la production de MO est importante dans la zone photique, plus la probabilité d'échapper à la minéralisation est grande.

Les sédiments étudiés à Erto sont de nature pélagique et indiquent des taux de sédimentation réduits et une activité des organismes benthiques limitées (très peu de bioturbations) due à la grande profondeur de dépôt. L'absence de pyrite (FeS_2) et de laminations dans les sédiments entourant la couche argileuse de la limite KT pourrait appuyer l'hypothèse d'un milieu bien oxygéné. A l'affleurement, la matière organique peut également subir une altération superficielle pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres. La coupe étudiée dans ce présent travail se situe, en effet, dans le lit d'un ruisseau (cf. Chapitre 4 (Coupe)).

Le minimum en carbone minéral observé à la limite KT (E1, E2, E3) est également visible sur la courbe des teneurs en calcite calculées au chapitre 7 (Minéralogie). Le carbone minéral entrant dans la composition de la calcite (CaCO_3), l'analogie entre l'approximation du niveau marin (calcite/détritisme) et la courbe du Cmin n'est pas une surprise. Cependant, les faibles valeurs de MinC observées à la transition entre la Scaglia Rossa et les marnes d'Erto (A5, A6) et les quelques centimètres au-dessus (J42, J48), ne sont que faiblement remarquées sur ce graphique de la calcite. Les sédiments à la limite KT ainsi que ceux du passage de la Scaglia Rossa aux marnes d'Erto sont essentiellement des argiles ; de faibles valeurs du MinC sont donc attendues, mais pas pour les échantillons marno-calcaires situés au-dessus de la transition (J42, J48). La nature plus marneuse des échantillons H5 à H10 permet d'expliquer la diminution des teneurs en MinC observée dans cet intervalle.

CHAPITRE 10

ETUDE DU PHOSPHORE

10.1 Introduction

Le phosphore est essentiel pour toutes les formes de vie sur terre, comme il joue un rôle important dans la plupart des processus métaboliques et est un constituant majeur du squelette. Dans les océans, les apports de phosphore sont presque entièrement contrôlés par le ruissellement continental (>90%) et moins de 10 % entrent dans les océans grâce au transport éolien (Van de Schootbrugge *et al.*, 2003). Les apports hydrothermaux sont considérés comme négligeables (Föllmi, 1996). L'efficacité du stockage dans le réservoir sédimentaire est dépendante des conditions redox et la régénération du phosphore est plus importante dans des eaux profondes pauvres en oxygène (Emeis *et al.*, 2000). Cette sensibilité de l'accumulation aux conditions redox peut être le résultat d'un « feedback » positif entre l'anoxie de la colonne d'eau, l'augmentation de la régénération benthique du phosphore et une augmentation de la productivité marine (Colman *et al.*, 2000).

Le taux d'accumulation du phosphore dans les sédiments est donc contrôlé par deux processus :

- L'apport du phosphore depuis les rivières et l'atmosphère qui est lié à l'altération, l'érosion et le ruissellement sur les continents.
- Le degré d'oxygénation des eaux profondes qui a un effet sur les conditions redox du milieu et sur la régénération du phosphore.

Le taux d'accumulation du phosphore permet d'éviter des problèmes de condensation et ainsi de comparer au mieux différentes sections entre elles. Il est défini en mg de phosphore par cm² par ka. C'est une multiplication de la concentration en phosphore (mg/g) par la densité (g/cm³) et le taux de sédimentation (cm/ka) obtenu au chapitre 6 (biostratigraphie). Comme tous les échantillons sont des calcaires marneux pélagiques à hémipélagiques, on a estimé que la densité est constante et égale à 2.5 g/cm³ pour tous les échantillons analysés.

Ainsi, une augmentation du taux d'accumulation de phosphore indique une augmentation de l'intensité de l'érosion et de l'altération continentale qui peut être, par exemple, induite à long terme par un réchauffement du climat ou une activité tectonique importante sur le continent. D'autre part, une diminution du taux d'accumulation de phosphore indique une diminution de l'altération qui peut être le résultat, par exemple, d'un basculement à un climat plus sec ou une diffusion des conditions dysoxiques à anoxiques dans les eaux profondes, ou l'effet combiné des deux processus (Föllmi, 1995 ; Bodin *et al.*, 2006). La productivité a également un rôle important à jouer dans le cycle du phosphore. En effet, une production primaire importante implique la présence de plus d'organismes capables d'utiliser cet élément et de l'intégrer dans les sédiments.

10.2 Méthode

L'analyse du phosphore total a été réalisée sur 63 échantillons à l'université de Neuchâtel, durant le mois de février 2006. La méthode utilisée est dérivée de la méthode d'extraction séquentielle SEDEX, développée par Ruttenberg (1992) et modifiée par Anderson et Delaney (2000).

Les poudres des échantillons préalablement broyés sont utilisées pour réaliser cette analyse. Du nitrate de magnésium y est ajouté afin de séparer les phosphates de la matière organique avant de les chauffer à 55°C, puis à 550°C. De l'acide chlorhydrique y est ensuite encore mélangé pour dissoudre les morceaux et on agite la solution pendant une nuit entière afin d'obtenir un mélange homogène. Un réactif colorant, dilué dans de l'eau désionisée, est incorporé à la solution obtenue afin de former un complexe coloré avec les phosphates. Cette coloration permet d'obtenir, à l'aide d'un spectrophotomètre, les concentrations en phosphore total exprimées en mg/g en les comparant avec des standards dont la teneur en phosphore est connue.

Pour de plus amples détails sur les manipulations, se référer à l'annexe 2.5.

10.3 Résultats

La concentration de phosphore varie entre 230 et 500 ppm tout au long de la coupe. Les taux d'accumulation de cet élément, ont également été observés et sont typiques de sédiments pélagiques à hémipélagiques. Les valeurs varient entre 0.15 et 0.40 mg/cm²/ka. Une moyenne mobile sur 3 valeurs a été calculée, afin de montrer les tendances principales de ces courbes (cf. **Fig 10.1**).

Une évolution positive des concentrations de phosphore est observée le long de la coupe de La Spesse. Sous la limite KT, les valeurs les plus faibles, variant de 230 à 300ppm, sont observées. Une légère augmentation est observée jusqu'à 40 cm sous la limite (G44 à F27). Ensuite, les valeurs diminuent jusqu'à l'échantillon F10, situé une dizaine de centimètres avant la transition Maastrichtien-Danien. Les concentrations augmentent ensuite pour atteindre un maximum de 503ppm pour l'échantillon H15 (30 cm au-dessus de la limite) et une augmentation importante des valeurs est observée pour les échantillons situés dans la couche argileuse de la limite KT. Ensuite, une diminution jusqu'à l'échantillon H20 est observée et est suivie par une augmentation des valeurs jusqu'à la transition entre la formation de la Scaglia Rossa et des marnes d'Erto (A3). Les concentrations restent ensuite stables jusqu'au haut de la coupe (J80).

Après corrections par rapport aux taux de sédimentation, les valeurs du taux d'accumulation de phosphore montrent les mêmes tendances que la courbe de la concentration de cet élément. La seule différence se situe autour de la limite KT. En effet, une diminution des valeurs est observée entre les échantillons F7 et H1, alors que les concentrations de phosphore forment un pic positif.

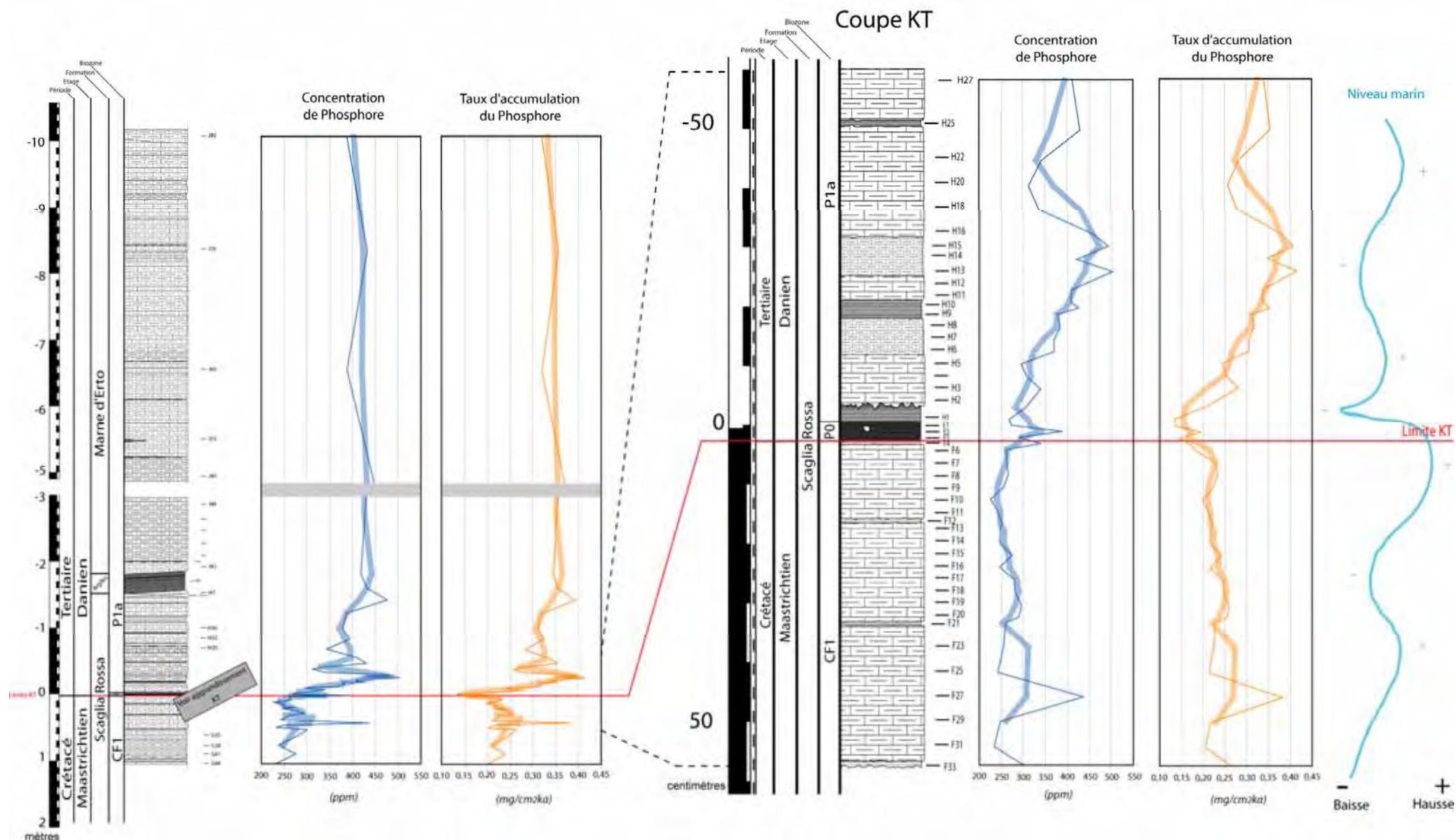


Fig 10.1 Concentration et taux d'accumulation du phosphore dans la coupe de La Spesse ainsi que la courbe du niveau marin obtenue au chapitre 7 (Minéralogie).

10.4 Interprétations

L'augmentation de la teneur brute en phosphore dans la couche argileuse de la limite KT est expliquée par le fait que cette zone est condensée. En effet, le taux de sédimentation est plus bas dans cette zone (0.20 cm/ka) que dans le reste de la coupe (~0.35 cm/ka), ce qui permet une concentration plus importante des éléments.

En étudiant le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, un crash de la productivité phytoplanctonique est généralement observé dans les strates du passage Crétacé-Tertiaire et constitue un critère pour définir cette limite (cf. Chapitre 1 (Introduction)). Cette diminution est généralement observée plusieurs centimètres avant le Danien et joue un rôle négatif dans l'intégration du phosphore dans les sédiments, surtout si cet élément est lié à la matière organique.

La diminution des teneurs qui débute 40 cm sous la limite peut donc être interprétée comme une baisse de la productivité due au cooling précédant la limite KT, diminuant les précipitations et donc les apports de nutriments dans l'océan. L'altération des basaltes formés à la suite du volcanisme du Deccan est un piège à CO_2 et peut être une cause de ce refroidissement climatique (Dessert *et al.*, 2001).

A plus long terme, l'émission de gaz dans l'atmosphère peut provoquer un réchauffement. Une certaine quantité de phosphore et de nutriments peut également être contenue dans les roches volcaniques. Ces phénomènes ont peut-être un rôle à jouer dans l'augmentation du taux d'accumulation observée dans les premiers centimètres daniens. Enfin, le niveau eustatique diminue au-dessus de la transition Maastrichtien-Danien (cf. **Fig 10.1**), permettant ainsi une altération continentale plus importante et une augmentation de la mobilisation des nutriments (Föllmi, 1996).

Une diminution de l'accumulation du phosphore peut également indiquer une diminution des apports continentaux ou une anoxie partielle à totale du milieu permettant une régénération de cet élément.

Le rapport calcite/détritisme calculé au chapitre 7.2.2 (Minéralogie), indique surtout une diminution de la production carbonatée à la limite KT.

D'après Keller *et al.* (1995), la dernière transgression maastrichtienne (cf. **Fig 10.1**) aurait pu favoriser la remontée de la zone d'oxygénation minimale (OMZ) installant des conditions anoxiques partielles à totales dans le milieu de dépôt. Un apport important de MO dû à la mortalité des microorganismes survenu avant et à la limite peut également avoir des effets réducteurs sur les conditions du milieu. En favorisant la régénération du phosphore du sédiment vers la colonne d'eau, la richesse nutritive de l'océan peut augmenter, aidant ainsi à la recolonisation *post* KT.

Une augmentation générale du détritisme est observée dans les dépôts daniens (cf. **Fig 10.2**) et peut également favoriser l'apport de nutriments, permettant une augmentation de la productivité primaire. Cet accroissement des teneurs en phosphore semble survenir rapidement et montre une reprise graduelle de la productivité dans les sédiments surmontant la limite KT (cf. **Fig 10.1**).

L'augmentation et l'accumulation générale de phosphore dans les sédiments tertiaires de la coupe de La Spesse semblent assez bien correspondre à l'évolution du détritisme calculée au chapitre 7 (Minéralogie). En effet, comme une image inverse du rapport calcite/détritisme, les valeurs augmentent et se stabilisent dans les marnes d'Erto (cf. **Fig 10.2**). Le phosphore contenu dans cette formation daniienne semble lié aux apports continentaux.

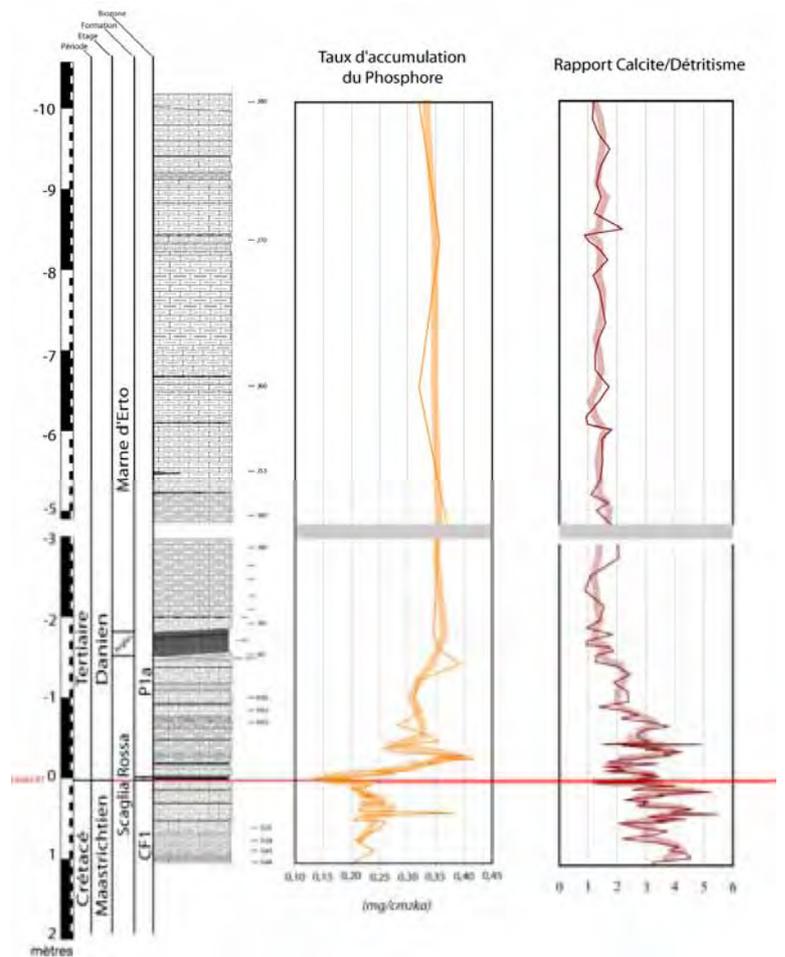


Fig 10.2 Comparaison entre les taux d'accumulation du phosphore et le rapport calcite/détritisme dans la coupe de La Spesse.

En comparant les taux d'accumulation de la calcite et du phosphore le long de la coupe de la Spesse, une absence de relation est observée (cf. **Fig 10.3**). En effet, un coefficient de corrélation (R^2) de 0.2 est obtenu. En étudiant les échantillons autour de la limite (cf. **Fig 10.4**), la relation semble positive, indiquant donc un lien possible ($R^2=0.5$) entre la diminution des teneurs en phosphore et une chute de la productivité carbonatée.

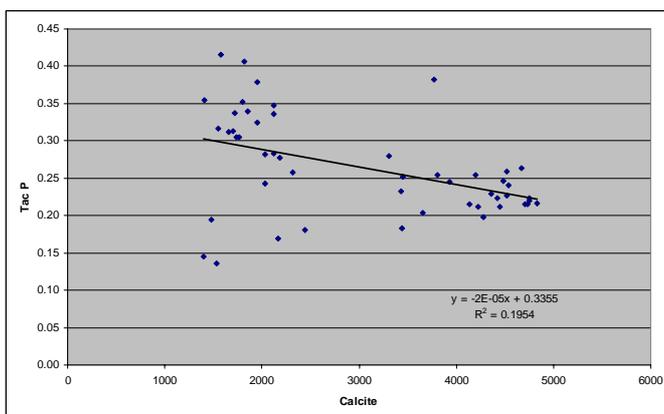


Fig 10.3 Comparaison entre les taux d'accumulation du phosphore et de la calcite sur les échantillons F33 à H36 de la coupe de La Spesse. Une droite de régression linéaire a été calculée.

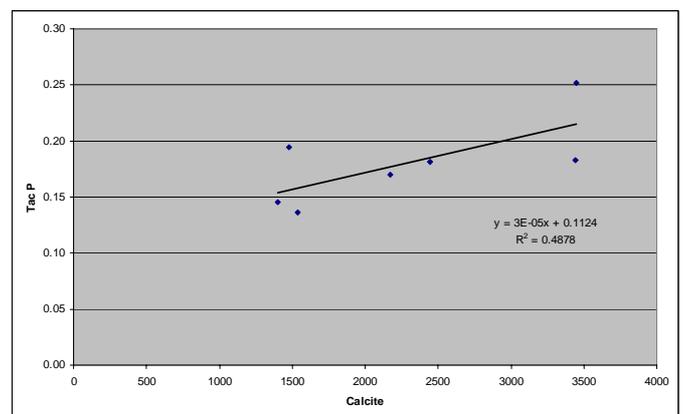


Fig 10.4 Comparaison entre les taux d'accumulation du phosphore et de la calcite sur les échantillons autour de la limite KT. Une droite de régression linéaire a été calculée.

La comparaison entre les taux d'accumulation du quartz et du phosphore indique les mêmes tendances que pour la calcite et le phosphore. En effet, aucune relation n'a pu être observée en étudiant tous les échantillons de la coupe de La Spesse (cf. **Fig 10.5**). Par contre, une corrélation positive semble définir les échantillons proches de la limite KT (cf. **Fig 10.6**), pouvant indiquer également un lien possible ($R^2=0.5$) entre la diminution des teneurs en phosphore et une baisse des apports terrigènes. Ces résultats constituent uniquement des approximations et doivent être utilisés avec précaution pour l'interprétation de la courbe du phosphore.

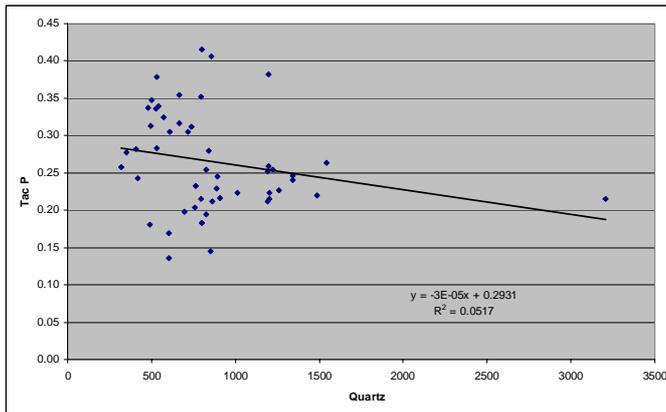


Fig 10.5 Comparaison entre les taux d'accumulation du phosphore et du quartz sur les échantillons F33 à H36 de la coupe de La Spesse. Une droite de régression linéaire a été calculée.

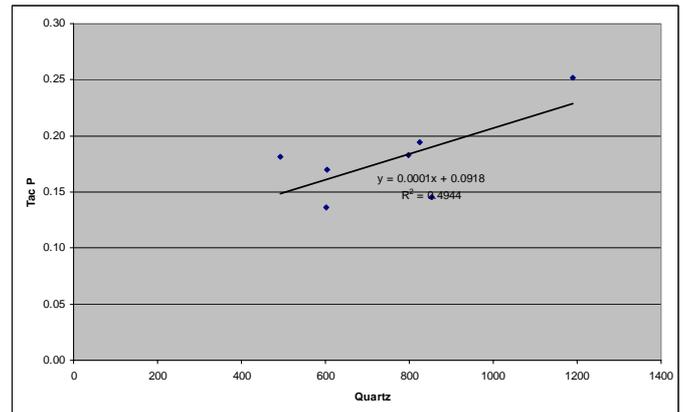


Fig 10.6 Comparaison entre les taux d'accumulation du phosphore et du quartz sur les échantillons autour de la limite KT. Une droite de régression linéaire a été calculée.

CONCLUSIONS

L'étude de la limite Crétacé–Tertiaire dans la coupe de La Spesse (Erto, Alpes du Sud) a permis de décrire plusieurs caractéristiques de cette transition, comme la disparition d'espèces de foraminifères planctoniques de grande taille et l'apparition et la survie d'espèces plus petites et stress-tolérantes, des variations eustatiques et climatiques, ainsi qu'une baisse de la productivité avant et dans la couche argileuse de la limite.

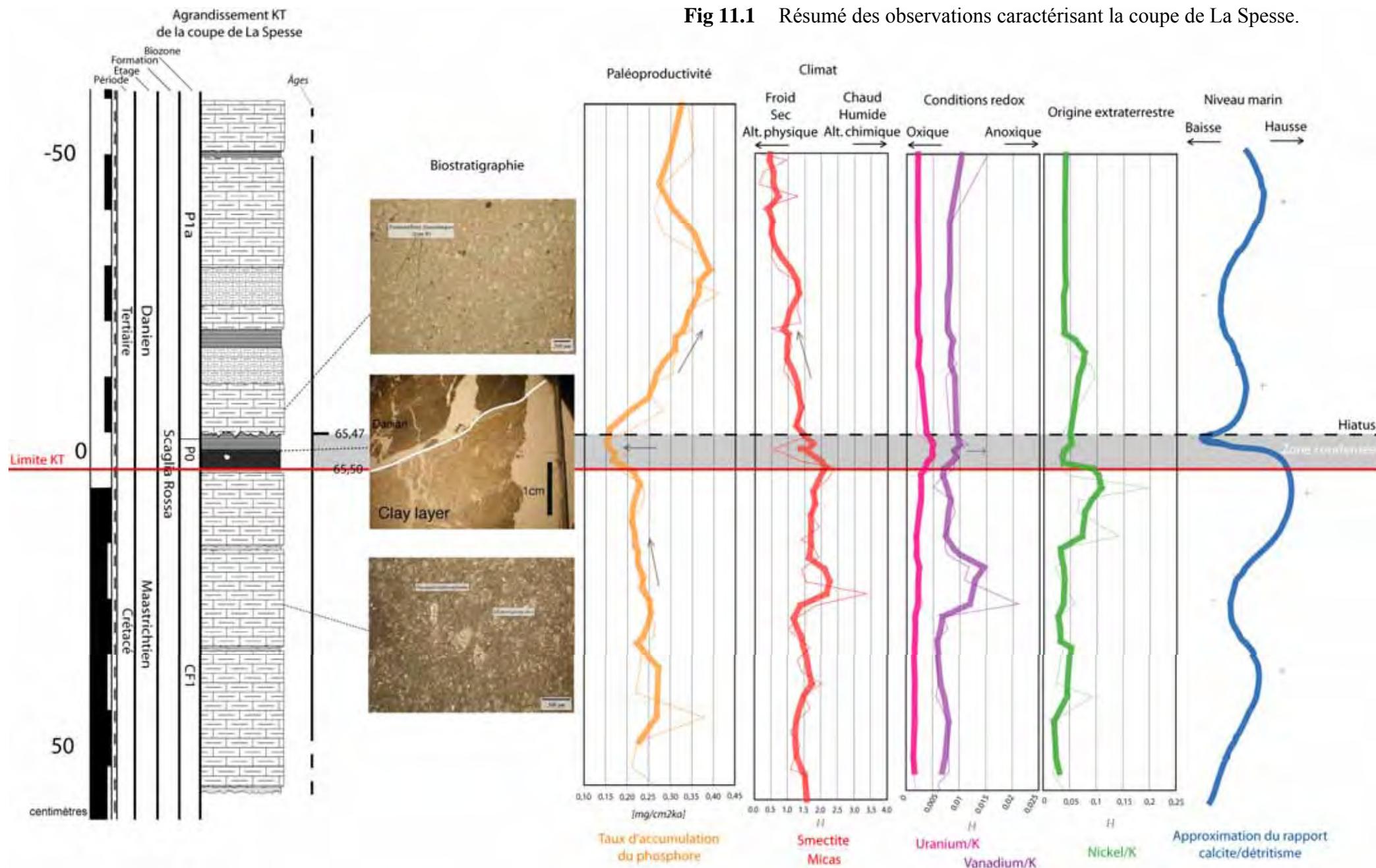
- ❑ La coupe de la Spesse est composée par les roches de la formation de la Scaglia Rossa et des marnes d'Erto. Cette section contient des roches marno-calcaires qui correspondent à des sédiments pélagiques déposés dans des milieux marins ouverts très calmes et profonds, ce qui permet, sur le terrain, d'observer des séries bien litées, parfois riches en argiles, avec des limites de bancs généralement planes. Ces microfaciès sont définis comme des micrites riches en foraminifères planctoniques. L'intervalle Maastrichtien – Danien, situé dans la formation de la Scaglia Rossa, est surmonté par une couche argileuse foncée de 2 à 3 cm d'épaisseur et est ainsi bien visible sur le terrain.
- ❑ Les données biostratigraphiques obtenues dans ce travail indiquent que la base de la coupe se situe au début de la zone CF1 (65,8 ma) et que le sommet se trouve dans la zone P3 ou P4 (<63,5 ma). Les sédiments du Danien terminal montrent déjà un assemblage de foraminifères stress-tolérants (*Guembelitra* et *Heterohelix*). La couche argileuse de la limite KT ne possède pas de faune et le sommet de la zone P0 est absent. De plus, les premiers sédiments tertiaires montrent un assemblage faunique se situant dans une partie déjà avancée de la zone danienne P1a, indiquant donc un hiatus, sans doute dû à la baisse du niveau marin connu à cette époque (Adatte *et al.*, 2002). L'extinction de la microfaune semble assez rapide mais reste sélective et progressive. Quelques espèces crétacées trouvées dans des couches Paléocènes sont interprétées comme survivantes (ex : *Guembelitra cretacea*). Elles sont simples, petites et ont une stratégie adaptative d'opportunistes (stratégie R) qui est la stratégie la mieux adaptée à des conditions de stress environnemental. D'autres espèces trouvées dans des couches Paléocènes sont considérées comme remobilisées car elles ont des formes complexes et une stratégie adaptative d'équilibre (stratégie K) (ex : *Globotruncids*) qui ne permet pas de survivre à une crise environnementale telle que celle survenue à la limite KT (Luciani, 1997). Les différentes biozones observées peuvent être ajustées et une datation relative est possible à l'aide des âges obtenus par Keller *et al.* (1995). Des vitesses d'accumulation basées sur 3 âges sont ensuite calculées, indiquant une condensation de la couche argileuse de la limite KT.
- ❑ Les assemblages minéraux indiquent une augmentation des apports continentaux de la base de la coupe jusque dans les marnes d'Erto. La formation des flyschs éocènes due à l'orogénèse de la chaîne des Alpes débute au-dessus des marnes d'Erto. Cette croissance des arrivées clastiques peut donc être expliquée par la fermeture de l'océan Téthys et l'activité tectonique croissante sur le continent. Une chute de la production carbonatée est observée à la limite suite à la crise biologique et à

l'extinction en masse des foraminifères planctoniques tropicaux et subtropicaux ainsi que des nannofossiles calcaires.

- ❑ L'approximation des variations eustatiques, sur la base du rapport calcite/détritisme, indique un niveau marin élevé à la limite suivi par une chute au sommet de P0, expliquant le hiatus découvert grâce à la microfaune.
- ❑ Lors de la transition Maastrichtien-Danien, l'assemblage des minéraux argileux met en évidence le passage d'un climat semi-aride avec une saisonnalité bien marquée alternant des périodes humides et sèches, caractérisé par une dominance de smectite, à un climat plus sec et froid, favorisant l'altération mécanique et la formation de micas. A 30 cm dans le Tertiaire, l'apport simultané de chlorite et de kaolinite en grande quantité, indique des apports terrigènes importants, dévoilant une érosion des reliefs continentaux plus importante. La fermeture de l'océan Téthys et le dépôt de flyschs proches de la zone d'étude peut expliquer ces variations des apports détritiques. Le haut de la coupe semble à nouveau dominé par la smectite et le mica.
- ❑ En analysant les marqueurs des conditions redox (V, U,...), l'étude des éléments traces a permis d'observer le passage à des conditions légèrement plus anoxiques dans la couche argileuse de la limite KT. Aucun enrichissement des éléments d'origine extraterrestre (Co, Ni, Cr,...) n'est observé à la limite ; la distribution de ces métaux traces dans la coupe de La Spesse ne semble donc pas liée aux météorites pourtant connues à cette époque. Les différentes augmentations examinées dans le Maastrichtien terminal pourraient donc être liées à des apports importants suite au volcanisme du Deccan. Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec précaution car certaines courbes indiquent une remobilisation diagénétique à la limite. De plus, des morceaux de calcite ont été découverts dans les lames minces de la couche argileuse P0 et semblent également être le résultat de la diagenèse.
- ❑ L'orogénèse alpine semble avoir passablement influencée les sédiments composant la coupe de La Spesse. En effet, aucune trace de matière organique n'a été décelée, indiquant probablement la dégradation de celle-ci lors de la formation des Alpes du Sud.
- ❑ La paléoproduktivité peut être étudiée grâce à l'analyse du phosphore contenu dans les sédiments. Le refroidissement durant la biozone CF1 est sans doute une cause de la diminution de la production primaire observée avant la limite KT. Le crash à la limite est interprété comme une chute de la productivité due à l'extinction en masse de la microfaune. La mise en place d'une légère anoxie à la limite suite à cet apport important de MO est remarquée et peut avoir permis la régénération du phosphore, apportant ainsi beaucoup de nutriments dans la colonne d'eau et permettant aux organismes de recoloniser l'océan après la crise. En effet, la courbe du phosphore montre ensuite rapidement une augmentation dévoilant une reprise graduelle de la productivité au-dessus de P0. Plus haut, l'augmentation de phosphore dans les marnes d'Erto semble être liée aux apports continentaux plus importants durant cette période.

Les observations principales autour de la limite KT sont résumées dans la page suivante (cf. **Fig 11.1**).

Fig 11.1 Résumé des observations caractérisant la coupe de La Spesse.



BIBLIOGRAPHIE

- Adatte T., Keller G., Stinnesbeck W. (2002) Late Cretaceous to early Paleocene climate and sea-level fluctuations: the Tunisian record. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 178, p.165-196.
- Adatte T. (2003) Evolution de la biosphère et extinction en masse, conjonctions de causes: Exemple de la limite Crétacé-Tertiaire. *Buletin de la société neuchâteloise des sciences naturelles*, 126/1, p.5-27.
- Adatte T. (2005) Cours BENEFRI clay-minerals sedimentology. *Université de Neuchâtel, non publié.*
- Affolter M. (2000) Etude des dépôts clastiques de la limite Crétacé-Tertiaire. *Travail de diplôme, Université de Neuchâtel, non publié.*
- Algeo T.J., Maynard J.B. (2004) Trace-element behaviour and redox faciès in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical geology* 206, p.289-318.
- Alvarez W., Smit J., Lowrie W., Asaro F., Margolis S.V., Claeys P., Kastner M., Hildebrand A.R. (1992) Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540. *Geology*, v. 20, p. 697-700.
- Anderson L.D., Delaney M.L. (2000), Sequential Extraction and Analysis of Phosphorus in Marine Sediments: Streamlining of the SEDEX Procedure. *Limnology and Oceanography*, Vol. 45, No. 2, p.509-515.
- Berger J.-P. (2003), Cours Bio-Chronostratigraphie, *Université de Fribourg, non publié.*
- Bodin S., Godet A., Föllmi K.B., Vermeulen J., Arnaud H., Strasser A., Fiet N., Adatte T. (2006), The late Hauterivian Faraoni oceanic anoxic event in the western 3 Tethys: Evidence from phosphorus burial rates. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 235, p.238-257.
- Bodin S., Godet A., Matera V., Steinmann P., Vermeulen J., Gardin S., Adatte T., Coccioni R., Föllmi K.B. (2006), Enrichment of redox-sensitive trace metals (U, V, Mo, As) associated with the late Hauterivian Faraoni oceanic anoxic event. *In press*
- Boker E., Bouzelboudjen M. (2004), Database design coupled with a GIS for water supply prospection in fissured aquifer media. *32nd International geological congress, Italia 2004, Florence, Italy, August 20-28, 1984.*
- Bostick B.C., Fendorf S. (2003) Arsenite sorption on troilite (FeS) and pyrite (FeS₂). *Geochim Cosmochim Acta* 67, p.909-921.
- Bouchet A., Meunier A., Sardini P. (2000), Minéraux argileux: structure cristalline, identification par

- diffraction de rayons X. *Bull. Centre Rech. Elf Exploration Production, Mém. 23, 136 p.*
- Boudzelboudjen M.** (2001), GIS et Statistiques Spatiales en hydrogéologie : Quelques éléments d'introduction. *Université de Neuchâtel.*
- Boudzelboudjen M.** (2005), Cours d'introduction aux bases de données spatiales et Systèmes d'Information Géospatiale pour les étudiants de 4^{ème} année de géologie et de biologie, *université de Neuchâtel.*
- Bouzelboudjen M., Ornstein P., Kimmeyer F.** (2001), TracES/View - Traçage des Eaux Souterraines : Application SIG en milieu karstique jurassien (Suisse). *7ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 14 p., 5 fig., 4 ann, p.59-73.*
- Bosellini A.** (1973), Modello geodinamico e paleotettonico delle Alpi Meridionali durante il Giurassico-Cretacico. *Acc. Naz. Lincei, Roma, Quaderno n.183 : « Moderne vedute sulla Geologia dell'Appennino », p.162-213.*
- Burgener V.** (2004), Présence et Distribution du Cachalot (*Physeter macrocephalus*) et de la Baleine à bec de Cuvier (*Ziphius cavirostris*) au Sud-Ouest de la Crête et le long de la Faille hellénique. *Université de Neuchâtel, travail de diplôme.*
- Burri M.** (1994), Connaître la nature en Valais, Les roches, *édition Pillet-Martigny.*
- Burrough P.A., McDonell R. A.** (1998), Principles of Geographical Information Systems. *Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press 133 p.*
- Caillere S., Henin S., Rautureau M.** (1989), Les Argiles, *éditions SEPTIMA, Paris, 126 p.*
- Caloz R., Collet C.** (1997), Geographic information systems (GIS) and remote sensing in aquatic botany : methodological aspects. *Aquatic botany, 58, p.209-228.*
- Castellarin A.** (1980), Introduction à la géologie générale d'Italie (p.65-p.70). *Societa italiana di mineralogia e petrologia.*
- Cojan I., Renard M.** (1999), Sédimentologie, *Dunod, Paris.*
- Collet C.** (1992), Systèmes d'information géographique en mode image. L. Maystre (eds). *Presses polytechniques et universitaire romande, Lausanne.*
- Colman A.S., Holland H.D.** (2000). The global diagenetic flux of phosphorus from marine sediments to the oceans; redox sensitivity and the control of atmospheric oxygen levels. *Glenn, C.R., Prévôt-Lucas, L., Lucas, J. (Eds.), Marine Authigenesis; From Global to Microbial, SEPM Special Publication, vol. 66, p.53-75.*
- Courtillot V.** (1999) Evolutionary catastrophes : The science of mass extinction. *Cambridge University Press, Cambridge.*
- Cowen J.P., Betram M.A., Baker G.T., Feely R.A., Massoth G.J., Summit M.** (1998) Geomicrobial transformations of manganese in Gorda Ridge event plumes. *Deep-Sea Res. II 45, p.2713-2737.*

- Dessert C., Dupre B., François L.M., Schott J., Gaillardet J., Chakrapani G., Bajpai S. (2001), Erosion of Deccan traps determined by river geochemistry: impact on the global climate and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.* 188, p.459-474.
- Dupraz C. (2002), Cours d'histoire de la terre. *Université de Neuchâtel, non publié.*
- Dymond J., Suess E., Lyle M. (1992), Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography*, vol.7, no.2, p.163-181.
- El Morjani Z., Wildi W., Jaquet J.-M., Bouzelboudjen M., Bouchaou, L. (2003), Conception d'un système d'information à références spatiales pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). *SIG 2003 : la conférence francophone ESRI, 1 et 2 Octobre 2003, Paris, France.*
- Emeis K.-C., Struck U., Leipe T., Pollehne F., Kunzendorf H., Christiansen C., (2000) Changes in the C, N, P burial rates in some Baltic Sea sediments over the last 150 years – relevance to P regeneration rates and the phosphorus cycle. *Marine Geology* 167, p.43– 59.
- Erickson D. J., Dickson S. M. (1987) Global trace element biogeochemistry at the K/T boundary, oceanic and biotic response to a hypothetical meteorite impact. *Geology* 15, p.1014–1017.
- Espitalié J., Deroo G., Marquis F. (1985-1986), La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Revue de l'institut Français du pétrole*, v.40, n°5, p.563-579 ; v.40, n°6, p.755-784 et v.41, n°1, p.73-89.
- ESRI (2004), ArcGis 9 full Version with ArcInfo, Environmental Systems Research Institute, California, USA.
- Föllmi, K.B. (1995), 160my record of marine sedimentary phosphorus burial: Coupling of climate and continental weathering under greenhouse and ice house conditions. *Geology*, june 1995, v.23, no. 6, 3 fig, p.503-506.
- Föllmi, K.B. (1996), The phosphorus cycle, phosphogenesis, and marine phosphate-rich deposits. *Earth-Science Reviews*, v. 40, p.55-124.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. (2003) Le sol vivant, base de pédologie. *Presse polytechnique et universitaire romande*, 592p.
- Golay F. (1992), Modélisation des systèmes d'information à référence spatiale et de leurs domaines d'utilisation spécialisés – aspects méthodologiques, organisationnels et technologiques. *PhD thesis N° 1080, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.*
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., and Smith, A.G., Agterberg, F.P., Bleeker, W., Cooper, R.A., Davydov, V., Gibbard, P., Hinnov, L.A., House, M.R., Lourens, L., Luterbacher, H.P., McArthur, J., Melchin, M.J., Robb, L.J., Shergold, J., Villeneuve, M., Wardlaw, B.R., Ali, J., Brinkhuis, H., Hilgen, F.J., Hooker, J., Howarth, R.J., Knoll, A.H., Laskar, J., Monechi, S., Plumb, K.A., Powell, J., Raffi, I., Röhl, U., Sadler, P.,

- Sanfilippo, A., Schmitz, B., Shackleton, N.J., Shields, G.A., Strauss, H., Van Dam, J., van Kolfschoten, T., Veizer, J., and Wilson, D. (2004) A Geologic Time Scale 2004. Cambridge University Press, 589 p.
- Hallam, A. (1989) The case for sea-level changes as a dominant causal factor in mass extinction of marine invertebrates. *Philos. Trans. R. Soc. London, B 325*, p.437-455.
- Hallam, A., Wignall, P.B. (1997) Mass extinctions and their aftermath. *Oxford University press*.
- Hallam, A., Wignall, P.B. (1999) Mass extinctions and sea-level changes. *Earth-Sci. Rev. 48*, p.217-250.
- Holland H.D., Turekian K.K. (2003) The Oceans and Marine Geochemistry : Controls of Trace Metals in Seawater. *Treatise on geochemistry Vol.6*, p.23-47.
- Jacquat O. (2003) L'évènement anoxique de la limite Cénomanién-Turonien dans l'Apennin du nord, Italie. Travail de diplôme, université de Neuchâtel, *Travail de diplôme, Université de Neuchâtel, non publié*.
- Jaquet J.M., (1996) Applications SIG aux sciences de la terre : Introduction. *Polycopié du cours de 3^{ème} cycle, 17-20 juin 1996. Département de Géologie, Université de Genève*.
- Keller G., Li L., MacLeod N. (1995) The Cretaceous/Tertiary boundary stratotype section at El Kef, Tunisia: How catastrophic was the mass extinction? *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol., 119*, p.221-254.
- Keller G., Adatte T., Stinnesbeck W., Luciani V., Karoui-Yaakoub N., Zaghib-Turki D. (2002) Paleocology of the Cretaceous-Tertiary mass extinction in planktonic foraminifera. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol., 178*, p.257-297.
- Keller G., Abramovich S. (2002) High stress late Maastrichtian Paleoenvironment in Tunisia: Inference from planktic foraminifera. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol., 178*, p.145-164.
- Keller G., Adatte T., Stinnesbeck W., Rebolledo-Vieyra M., Fucugauchi J.U., Kramar U., Stüben D. (2004) Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. *PNAS, vol.101, no 11*, p.3753-3758.
- Keller G., Pardo A. (2004) Disaster opportunists Guembelitrinidae : index for environmental catastrophes. *Marine Micropaleontology 53*, p.83-116.
- Kring D.A., Durda D.D. (2003) The day the world burned. *Scientific american, inc., december*, p.98-105.
- Kübler, B., 1983. Dosage quantitative des minéraux majeurs des roches sédimentaires par diffraction X. *Neuchâtel, Suisse, Cahiers Instituts de Géologie, série ADX, vol. 1, 12 p.*
- Lemoine M., De Graciansky P.-C., Tricart P. (2000) De l'océan à la chaîne de montagnes. *Gordon and Breach Science Publishers*
- Lethiers F. (1998) Evolution de la biosphère et événements géologiques. *Gordon and Breach science publishers*.

- Luciani V. (1989) Stratigrafia sequenziale del Terziario della Catena del Monte Baldo (Province di Verona e Trento). *Memorie di Scienze Geologiche* 41, p.351-363.
- Luciani V. (1997) Planktonic foraminiferal turnover across the KT boundary in the Vajont valley (southern Alps, northern Italy). *Cretaceous Research*, 18, p.799-821.
- Mac Arthur R.H., Wilson E.O. (1967) The theory of islands biogeography. *Princeton Univ. Press, Princeton, N.J.*
- Macleod N., Keller G. (1996) Cretaceous-Tertiary mass extinctions biotic and environmental changes. *W.W. Norton and company*, p.415-449.
- Marthaler M. (2002) Le Cervin est-il africain ?, *éditions Loisirs et Pédagogie S.A., Lausanne.*
- Martinez Ruiz F., Ortega Huertas M., Palomo I., Barbieri M. (1992) The geochemistry and mineralogy of the Cretaceous-Tertiary boundary at Agost (southeast Spain). *Chemical geology*, 95, p.265-281.
- Martinez Ruiz F., Ortega Huertas M., Palomo I., Smit J. (2002) Cretaceous-Tertiary boundary at Black Nose (ODP Leg 171B): A record of the Chicxulub impact ejecta. *Geological Society of America*, s.p. 356, p.189-199.
- Molina E., Arenillas I., Arz A. (1996) The Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction in planktonic foraminifera at Agost, Spain. *Revue de micropaléontologie* 22, p.225-243.
- Murray J.W. (1976) A method of determining proximity of marginal seas to an ocean. *Marine Geology* 22, p.103-110.
- Murray J.W. (1991) Ecology and palaeoecology of benthic Foraminifera. 397 p. *Longman Scientific & Technical, London.*
- Murray R. W., Leinen M. (1993) Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific across a latitudinal transect at 135° W; Tracking sedimentary major, trace, and rare earth element fluxes at the Equator and the ITCZ. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, p.4141-4163.
- Oppizzi D. (1998) Introduction à la découverte de la Valle Cimoliana et son parc (Parco Naturale Dolomiti Friulane).
- Rais P. (2001) Etude stratigraphique de la limite Cénomanién-Turonien : Corrélation des coupes de Cassis et Vergons (France). *Travail de diplôme, Université de Neuchâtel, non publié.*
- Ruttenberg K.C. (1992), Development of a Sequential Extraction Method for Different Forms of Phosphorus in Marine Sediments. *Limnology and Oceanography*, Vol. 37, No. 7, p.1460-1482.
- Skeleton P. (2003), The Cretaceous World. *The Open University.*
- Snow L.J., Duncan R.A., Bralower T.J. (2005) Trace element abundances in the Rock Canyon Anticline, Pueblo, Colorado, marine sedimentary section and their relationship to Caribbean plateau construction and OAE2. *Paleoceanography*, vol.20, no.3, 14 p.
- Stüben, D., Kramer U., Berner Z., Eckhardt J.D., Stinnesbeck W.,

- Keller G., Adatte T., Heide K. (2002) Two anomalies of platinum group elements above the Cretaceous-Tertiary boundary at Beloc, Haiti: Geochemical context and consequences for the impact scenario. *Geological Society of America, Special Volume, 356*, p.163-188.
- Tomlin C.D. (1993), Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. *Prentice Hall*, 249 p.
- Tribovillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. (2006) Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies : An update. *Chemical geology*. 21 p.
- Van de Schootbrugge B., Kuhn O., Adatte T., Steinmann P., Föllmi K., (2003), Decoupling of P- and Corg-burial following Early Cretaceous (Valanginian-Hauterivian) platform drowning along the NW Tethyan margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 199, p.315-331.
- Verrechia E. (2004) Cours de traitement quantitative des données. *Université de Neuchâtel, non publié.*
- Zappaterra E. (1990) Carbonate paleogeographic sequences of the Periadriatic region. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, v. 109, p.5–20.

SITES INTERNET :

Reconstruction paléogéographique : <http://www.scotese.com>

Bourque P.A. (1997-2004) Planète terre : http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html

PROGRAMMES INFORMATIQUES UTILISES :

ESRI (2004), ArcGis 9 full Version with ArcInfo, Environmental Systems Research Institute, California, USA.

Google earth (2005)

Matlab 7.0 (2004), The MathWorks, Inc.

World Wind 1.3, NASA

ANNEXES

1	CARTOGRAPHIE
2	MÉTHODES
3	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

ANNEXE 1

CARTOGRAPHIE

1.1 Etapes du rapport SIG

- 1) Création des dossiers
- 2) Géoréférenciation de la carte topographique au 1 :25'000
- 3) Création d'une grille
- 4) Numérisation des rivières et des routes
- 5) Numérisation de la géologie
- 6) Insertion des azimuts et des pendages

1.1.1 Création des dossiers

Avant de commencer le projet avec ArcInfo et ArcView, il faut définir un dossier général dans lequel on classera tous les fichiers engendrés par le projet. Dans le cas présent, le chemin d'accès sur l'ordinateur est le suivant : « M:\diplome\carto\ ». L'étape suivante concerne les sous-dossiers à créer afin de ranger les différents types de fichiers réalisés. Ces dossiers sont les suivants :



Fig 1 Dossiers créés pour le projet SIG

1.1.2 Géoréférenciation de la carte topographique

La carte de base utilisée pour cette cartographie en Italie est la carte topographique au 1 :25'000 « Dolomiti di sinistra Piave ». La surface couvrant la région cartographiée a tout d'abord été scannée avec une résolution de 150 dpi dans la salle B 313, puis sauvegardée dans le sous-dossier « image_data » sous le nom « erto.tif ». Ensuite, pour pouvoir utiliser cette carte comme base de travail dans le logiciel, il est nécessaire de la géoréférencer. 3 points de référence sont nécessaires afin que chaque point de la carte ait des coordonnées précises. Pour le projet présenté ici, 4 points ont été géoréférencés.

Voici la marche à suivre :

- a. Cliquer « Démarrer » → « Programmes » → « Arcgis » → « Arcinfo workstation » → « Arc »
- b. Dans « Arc », écrire « workspace M:\diplome\carto\image_data ↵ »
- c. Puis « register erto.tif ↵ »
- d. Dans la fenêtre qui vient de s'ouvrir, cliquer sur le premier point de référence, puis introduire ses coordonnées XY séparées par un espace dans « View » → « Link Actions ». Le bouton gauche de la souris permet de déplacer le champ de vision, alors que le bouton droit permet d'en modifier la taille. Pour actualiser la vue choisie, cliquer « View » → « Redraw Overlay Canvas ».
- e. Répéter l'opération pour les autres points de références.
- f. Cliquer « Register »
- g. Cliquer « Done »
- h. Cliquer « Save Transformation »

On peut à présent importer la carte dans ArcView sous forme d'un nouveau thème en allant le chercher dans « M:\diplome\carto\image_data\erto.tif ». La carte des affleurements ainsi que celle interprétative, toutes 2 réalisées à la main, ont également été scannées et géoréférencées afin de faciliter le travail de numérisation.

Ensuite, il faut encore regarder les unités dans lesquelles nous travaillerons (en mètres dans ce travail). Pour ce faire, aller dans « View » → « Properties ».

1.1.3 Numérisation des différents thèmes

Numérisation des points : exemple pour les sommets

Pour insérer un nouveau thème dans ArcView qui contient les points des principaux sommets, il faut procéder comme suit :

- a. Cliquer sur « View » → « New Theme »
- b. Choisir l'option « Point »
- c. Donner le nom du nouveau thème, ici : sommets
- d. L'enregistrer dans « M:\diplome\carto\shapefile_data »
- e. Pour commencer la numérisation, choisir « Theme » → « Start Editing »
- f. Ensuite, placer les points manuellement.

- g.** Lorsque la numérisation est terminée, choisir « Theme » → « Stop Editing ». Les changements seront sauvegardés dans « M:\diplome\carto\shapefile_data\sommets.shp »

Numérisation des lignes

Pour créer des lignes, la procédure est la même. Les thèmes créés grâce à cette option sont les suivants : Rivières, routes, structures géologiques. La géologie interprétée (lithologies) est créée dans ce menu, mais sera transformée par la suite en polygones.

- a.** Cliquer sur « View » → « New Theme »
- b.** Choisir l'option « Line »
- c.** Donner le nom du nouveau theme
- d.** L'enregistrer dans « M:\diplome\carto\shapefile_data
- e.** Pour commencer la numérisation, choisir « Theme » → « Start Editing »
- f.** Tracer ensuite les lignes manuellement. Une fois arrivé en bord de fenêtre, il suffit de cliquer le bouton droit de la souris et choisir l'option « Pan » afin de recentrer la fenêtre.
- g.** Si vous voulez fermer une ligne, il existe une commande. Aller dans « Theme » → « Properties », ensuite choisir la fonction « Editing ». Puis, dans « Snapping », les cases « General » et « Interactive » doivent être cochées. La marge peut alors être choisie pour qu'un nouveau point se mette à la même place qu'un point existant pour fermer la ligne en question.
- h.** Il y a une autre façon de faire pour fermer des lignes. Sélectionner toutes les lignes et utiliser la fonction « Join Feature »
- i.** Lorsque la numérisation est terminée, choisir « Theme » → « Stop Editing ». Les changements seront sauvegardés dans « M:\diplome\carto\shapefile_data\nom_du_theme.shp »

Numérisation des polygones

Il y a 2 manières pour numériser des polygones dans ArcView.

- 1.** La première est semblable à la méthode décrite pour numériser des points ou des lignes, en choisissant l'option « polygone ». On peut utiliser cette manière de faire pour les polygones qui ne se touchent pas. Dans ce travail, elle a été utilisée afin de numériser les lacs.
- 2.** La deuxième méthode évite les problèmes si des polygones du même thème sont côte à côte. Elle a été utilisée pour numériser les affleurements et la lithologie.
 - a.** Créer un nouveau thème avec l'option « Line »
 - b.** Former le bord des polygones, puis sauver les transformations
 - c.** Dans « Arc », taper « Arctools », puis retour
 - d.** Cliquer ensuite sur « Edit Tools », puis « OK »
 - e.** Dans « Edit Tools », entrer dans le menu « Arctools » et sélectionner « Workspace »

- f.** Définir le workspace où seront placés les fichiers créés pendant l'opération (dans ce travail : m:\diplome\carto\tmp_data)
- g.** Dans le menu « Tools », choisir « Command Tools », puis « OK »
- h.** Dans « command Tools », entrer dans le menu « conversion », choisir « To Arc » et ensuite « Shape to Arc »
- i.** Dans la nouvelle fenêtre, mettre dans « Input » le shapefile à corriger (par exemple : m:\diplome\carto\shapefile_data\affleurements.shp) et dans « Output » le nom du fichier transformé (par exemple : m:\diplome\carto\tmp_data\affeur.shp)

Un fichier comprenant les lignes est alors créé. Avant de transformer toutes les lignes en polygones, il est nécessaire de les fermer sur elles-mêmes.

- j.** Pour ouvrir ce fichier, aller dans « File » et choisir « Coverage : Open... », puis cliquer le nom introduit au point **j.** dans « Output » et sélectionner « Arc » dans le cadre « Available features »
- k.** Dans le menu « Display », choisir « General Drawing Environnement ». Choisir « Node » dans la première colonne et « Errors », « Dangle », « Symbols » dans la deuxième. Enfin, choisir la couleur des symboles et cliquer sur « OK » puis « Apply »
- l.** Cliquer dans le menu « Display » l'option « Pan Zoom »
- m.** On peut ensuite corriger les erreurs. Grâce à la fenêtre « Features Selection », on peut sélectionner les lignes. La fenêtre « Edit Arc & Nodes » permet de fermer celles-ci avec les icônes « Inter », « Over », « Under », « Snap ».
- n.** Aller dans « File » et cliquer « Save » lorsque toutes les lignes sont fermées
- o.** Fermer ArcTools

Il faut ensuite créer des polygones à partir des lignes qui viennent d'être fermées

- p.** Pour créer des polygones, dans « Arc », taper « build nom_du_coverage poly »
- q.** Pour contrôler si toutes les erreurs ont été corrigées, taper « clean nom_du_coverage ». Il est possible de faire une copie pour chaque étape en écrivant « copy nom_du_coverage nouveau_nom_du_coverage »
- r.** Plusieurs paramètres des polygones peuvent être enregistrés :
 - Taper « createlabels nom_du_coverage_poly » pour numéroter chaque polygone.
 - Taper « centroilabels nom_du_coverage_poly » pour enregistrer le centre de chaque polygone
 - Taper « ungenerate poly nom_du_coverage_poly nom_du_coverage_poly.txt » pour créer un fichier .txt avec toutes les données de chaque polygone. Ce fichier sera classé dans le dossier « ascii_data »
 - Taper « ungenerate point nom_du_coverage_poly nom_du_coverage_poly.txt » pour créer un fichier .txt avec toutes les données de chaque point constituant un polygone. Ce fichier sera classé dans le dossier « ascii_data »
- s.** Pour exporter les fichiers dans ArcView, taper « export cover nom_du_coverage_poly nom_du_coverage_poly.e00 » dans « Arc »
- t.** Transformer ensuite le fichier .e00 en .shp grâce à « Import71 ». Dans la case « Export Filename », le fichier .e00 est sélectionné, puis dans la case « Output Data Source », le dossier « arcinfo_data » est affiché et un nom est attribué au fichier.

- u. Ensuite aller dans ArcView, aller dans « View », « Add Theme » et sélectionner les noms des coverages.
- v. Les différents thèmes (affleurements, lithologies) apparaissent maintenant sous forme de polygones. Le nom ainsi que les couleurs peuvent être changés en double-cliquant sur le thème en question.

1.1.4 Insertion de l'azimut et du pendage

Avant de commencer, il faut insérer une nouvelle extension au projet : « file » → « extensions » puis, cocher « plot_geodata2 ». Une nouvelle barre d'outils apparaît.

Les fichiers du dossier `pendages_data` contiennent les azimuts et pendages ainsi que diverses informations des points notés à la main sur la carte.

Les azimuts et pendages sont mis manuellement sur la carte grâce au bouton « ⊥ ».

Attention, la taille du symbole est totalement indépendante de l'échelle de la carte. Il faut donc prendre garde à donner une bonne grandeur au symbole ainsi qu'au chiffre afin qu'il sorte à la bonne échelle par rapport au reste de la carte lors de l'impression.

1.1.5 Création d'une geodatabase

Les différentes données géographiques générées par Arcview (Shapefiles) ou Arcinfo (Coverages) sont parfois difficiles à gérer. La création d'une « Personal Geodatabase » permet de stocker toutes ces informations en une seule entité dans une base de données Access. Les données sont regroupées dans des sous-ensembles appelés « Feature Dataset », qui sont des sortes de container prévus pour recevoir les « Feature Class » d'une région géographique donnée. Tous les « Feature Class » d'un « Feature Dataset » sont donc stockés dans le même système de projection. Les « Feature Class » sont les structures de stockage des données proprement dites, c'est à dire de l'équivalent des Shapefiles ou des Coverages. Une même « Personal Geodatabase » peut contenir plusieurs « Feature Dataset ».

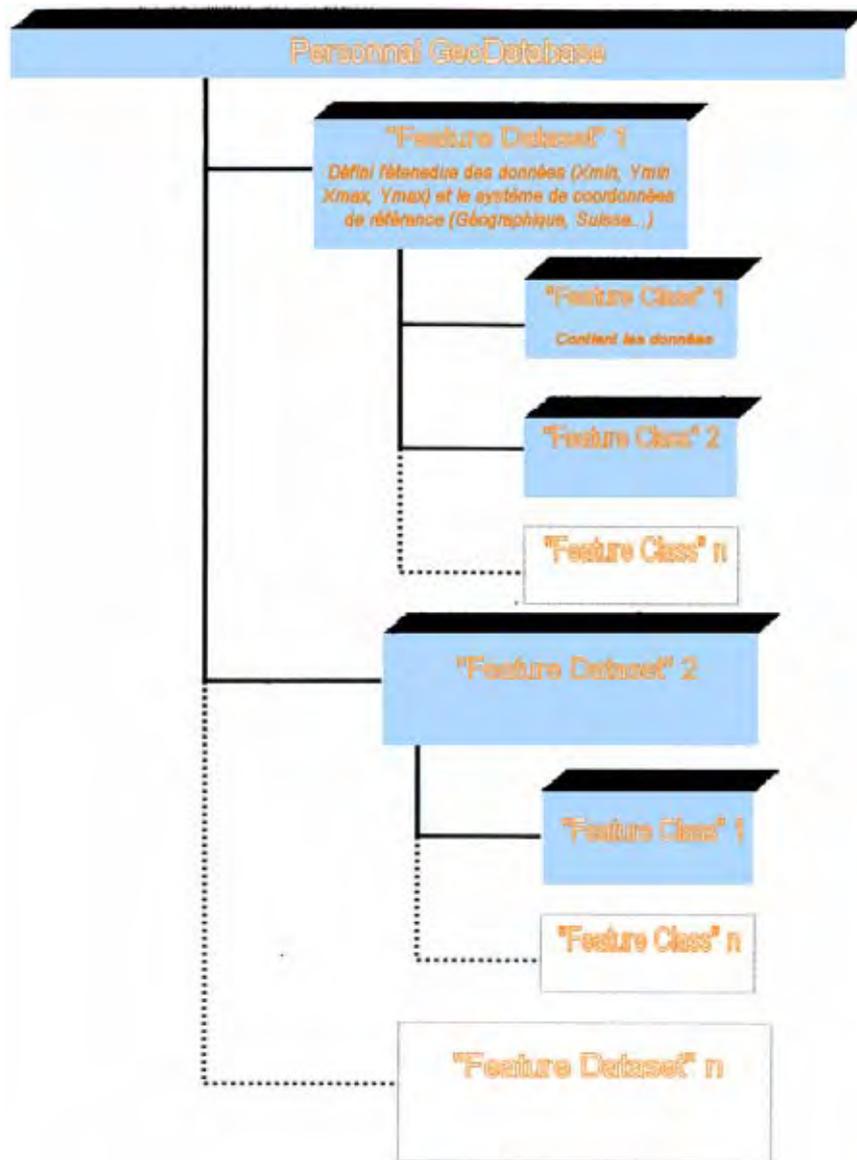


Fig 2 Relation entre « Personal Geodatabase », « Feature Dataset » et « Feature Class ». (modifié d'après exercice Bouzelboudjen, 2005)

Ce système permet d'importer et de transformer des données de plusieurs systèmes de projection différents pour les mettre en rapport dans une même projection et ainsi obtenir une relation exacte dans l'espace entre ces différentes données.

- a. Lancer ArcCatalog
- b. Choisir le répertoire dans lequel construire la « Personal Geodatabase ». Ici : m:\diplome\carto\geodatabase_data
- c. Créer 2 dossiers : *mdb* et *shp*
- d. Dans le nouveau dossier *mdb* cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner « New », « Personal Geodatabase »
- e. Ensuite, bouton droit sur la « Personal Geodatabase » choisir « New », « Feature dataset ».
- f. Saisir le nom de votre « Feature Dataset » puis, cliquer sur « Edit »

- g. Définir le système de référence de ce « Feature Dataset » en cliquant sur « Select »
- h. Sélectionner le système de projection correspondant à l'étude. Pour ce travail, on choisit le dossier *Projected Coordinate Systems*, puis *Utm* et enfin UTM 33 N. Ensuite cliquer sur « Add »
- i. On doit ensuite définir les limites du domaine XY. On active « X/Y Domain ». Nous avons ici X min : 292'000, X max : 300'000 et Y min : 5'123'000 et Y max : 5'132'000. Ensuite « Appliquer » et « Ok »
- j. On peut maintenant importer des données dans notre « container ». Sélectionner le « Feature Dataset » et avec le bouton droit de la souris, cliquer sur « Import », « Feature Class (multiple) ».
- k. Sélectionner ensuite tous les Shapefiles à importer. Il est tout à fait possible de mettre en relation des Shapefiles avec des systèmes de coordonnées différentes. Ici : m:\diplome\carto\shapefile_data*.shp
Cliquer « Ok » pour lancer le traitement
- l. Les données des Shapefiles d'origines (shapefile_data*.shp) sont maintenant également dans le « Feature Dataset » et toutes dans le même système de coordonnées (UTM 33 N).
- m. On peut à présent exporter nos Shapefiles ayant le même système de coordonnées pour les utiliser avec Arcview. Cliquer avec le bouton droit sur le « Feature dataset » et sélectionner « Export », « To Shapefile (multiple) ».
Choisir le dossier où les exporter (m:\diplome\carto\geodatabase_data\shp) et cliquer « Ok ».

1.1.6 Organigramme

Les différents fichiers ont été classés de la façon suivante :

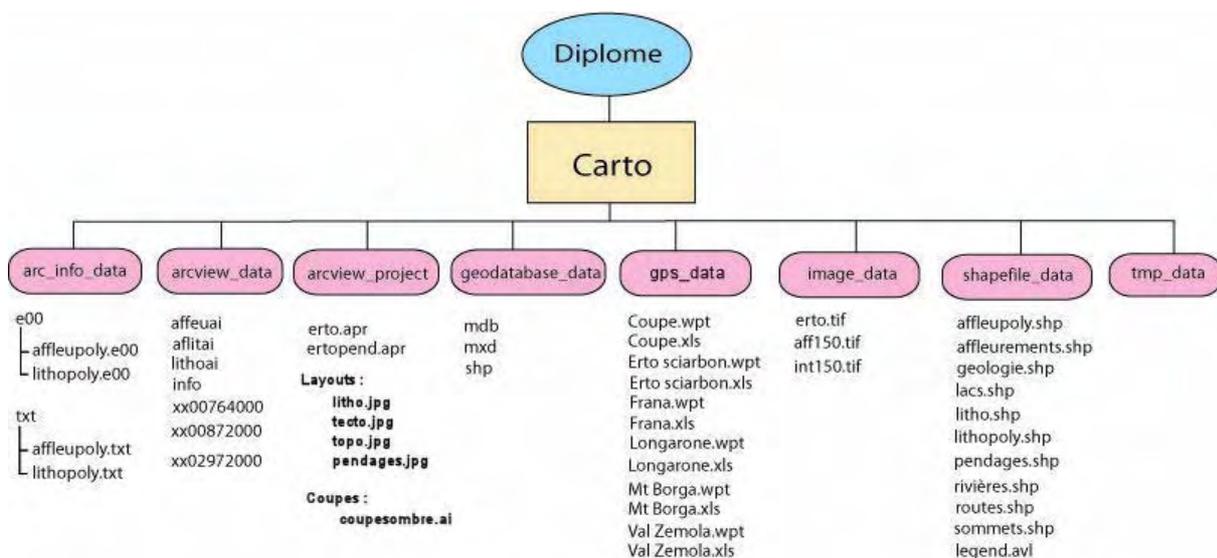


Fig 3 Organisation des fichiers du projet SIG de cartographie dans les Dolomites

1.2 Données GPS

Erto Sciarbon					
H SOFTWARE NAME & VERSION					
I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. http://www.wdgps.com					
H COORDINATE SYSTEM					
U LAT LON DEG					
H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0000	N46.28175500	E012.36967667	31 août 1005	932
W	Pt0001	N46.28423333	E012.36971000	31 août 1005	949
W	Pt0002	N46.28383667	E012.36762500	31 août 1005	1002
W	Pt0003	N46.28428667	E012.36844833	31 août 1005	1010
W	Pt0004	N46.28183000	E012.36463167	31 août 1005	1078
W	Pt0005	N46.28094000	E012.36406500	31 août 1005	1056
W	Pt0006	N46.27566167	E012.36248333	31 août 1005	1050
W	Pt0007	N46.27575167	E012.36048833	31 août 1005	1047
W	Pt0008	N46.27252333	E012.34438167	31 août 1005	936

Mt Borga					
H SOFTWARE NAME & VERSION					
I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. http://www.wdgps.com					
H COORDINATE SYSTEM					
U LAT LON DEG					
H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0000	N46.27415000	E012.33149833	01.sept.05	990
W	Pt0001	N46.27539500	E012.33243667	01.sept.05	1087
W	Pt0002	N46.27599833	E012.33113167	01.sept.05	1139
W	Pt0003	N46.27587000	E012.32990333	01.sept.05	1159
W	Pt0004	N46.28088667	E012.33246667	01.sept.05	1584
W	Pt0005	N46.28449833	E012.34010167	01.sept.05	1931
W	Pt0006	N46.28785833	E012.34368667	01.sept.05	2128
W	Pt0007	N46.28967167	E012.34415667	01.sept.05	2185
W	Pt0008	N46.29364167	E012.34948333	01.sept.05	2219
W	Pt0009	N46.27989333	E012.35716167	01.sept.05	1379
W	Pt0010	N46.27886500	E012.35775833	01.sept.05	1311

Val Zemola

H SOFTWARE NAME & VERSION

I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. <http://www.wdgps.com>

H COORDINATE SYSTEM

U LAT LON DEG

H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0000	N46.28786000	E012.36953167	03.sept.05	1059
W	Pt0001	N46.28873333	E012.36819167	03.sept.05	1041
W	Pt0002	N46.28890000	E012.36818500	03.sept.05	1026
W	Pt0003	N46.28989500	E012.36765333	03.sept.05	1067
W	Pt0004	N46.29082000	E012.36672333	03.sept.05	1083
W	Pt0005	N46.29172333	E012.36780833	03.sept.05	1112
W	Pt0006	N46.30016000	E012.36646500	03.sept.05	1325

Dimanche

H SOFTWARE NAME & VERSION

I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. <http://www.wdgps.com>

H COORDINATE SYSTEM

U LAT LON DEG

H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0001	N46.27279167	E012.36281667	04.sept.05	889
W	Pt0002	N46.27308667	E012.36309667	04.sept.05	810
W	Pt0003	N46.27321500	E012.36334000	04.sept.05	826
W	Pt0004	N46.27318167	E012.36326333	04.sept.05	830
W	Pt0005	N46.27304833	E012.36317500	04.sept.05	813
W	Pt0006	N46.27300667	E012.36310500	04.sept.05	827
W	Pt0007	N46.26815333	E012.32968000	04.sept.05	732
W	Pt0008	N46.26815667	E012.32825167	04.sept.05	749
W	Pt0009	N46.26668000	E012.35528833	04.sept.05	676
W	Pt0010	N46.26760667	E012.35612500	04.sept.05	639
W	Pt0011	N46.27228333	E012.36414833	04.sept.05	774

Lundi

H SOFTWARE NAME & VERSION

I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. <http://www.wdgps.com>

H COORDINATE SYSTEM

U LAT LON DEG

H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0000	N46.26668833	E012.30520000	05.sept.05	757
W	Pt0001	N46.26659833	E012.31284167	05.sept.05	478
W	Pt0002	N46.27262000	E012.30922833	05.sept.05	435
W	Pt0003	N46.27087667	E012.32860333	05.sept.05	975
W	Pt0004	N46.26944167	E012.32579000	05.sept.05	955
W	Pt0005	N46.26939833	E012.32522833	05.sept.05	952
W	Pt0006	N46.27987833	E012.38138500	05.sept.05	784

Frana

H SOFTWARE NAME & VERSION

I PCX5 2.09 By WDGPS_CE. <http://www.wdgps.com>

H COORDINATE SYSTEM

U LAT LON DEG

H	IDNT	LATITUDE	LONGITUDE	DATE	ALTITUDE
W	Pt0000	N46.26047333	E012.35977000	06.sept.05	854
W	Pt0001	N46.25297667	E012.36026667	06.sept.05	960
W	Pt0002	N46.25356333	E012.36149333	06.sept.05	962
W	Pt0003	N46.25553667	E012.36220500	06.sept.05	941
W	Pt0004	N46.25720333	E012.36355167	06.sept.05	926
W	Pt0005	N46.25874000	E012.36285667	06.sept.05	906
W	Pt0006	N46.26086667	E012.36374167	06.sept.05	821

ANNEXE 2

METHODES

2.1 Biostratigraphie

2.1.1 Lavages

L'étude des microfossiles sous forme dégagée n'est possible qu'après lavage de l'échantillon. Cette méthode consiste à dégager les foraminifères de leur gangue, afin de pouvoir effectuer leur détermination.

- Protéger l'évier et tout le plan de travail avec du plastique pour éviter de le colorer avec le Bleu de Méthylène utilisé plus tard.
- Mettre des fragments de l'échantillon dans un gobelet de yaourt (couvrir le fond).
- Ajouter du Desogen (pure (100%)) afin de recouvrir tout l'échantillon.
- Couvrir avec un papier filtre pour limiter l'évaporation et laisser reposer en remuant de temps en temps.
- La désagrégation devrait se faire en 1 à 7 jours (ou plus) suivant la composition de la roche.
- Laver à l'eau courante sur les tamis en prenant soin de récupérer les fractions $>63\mu\text{m}$ et $>36\mu\text{m}$.
- Une maille de $250\mu\text{m}$ peut être mise tout en haut afin d'éliminer les trop grands résidus.
- Pour récupérer le matériel, utiliser des papiers filtres bricolés en cônes (cf **fig 1**).

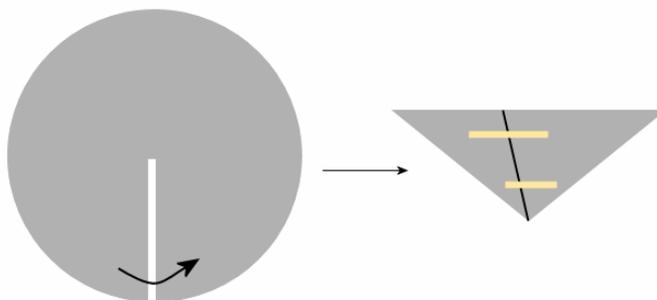


Fig 1 Schéma expliquant la fabrication des cônes.

- Poser ensuite les deux cônes sur des gobelets afin de laisser s'écouler l'eau et entreposer au dessiccateur pour un jour environ.
- Une fois sec, récupérer le matériel dans petit tube d'échantillonnage.

- Entre chaque lavage, les tamis doivent être nettoyés afin d'éviter la contamination de l'échantillon suivant.
- Rincer les tamis à l'eau courante en enlevant tous les résidus coincés dans les mailles.
- Tremper les tamis dans du Bleu de méthylène à 3% et les rincer. (Cette manipulation permet de colorer les éventuels microfossiles récalcitrants et ainsi de les reconnaître facilement s'ils se retrouvent dans le tube d'échantillonnage suivant)
- Sécher les tamis et les souffler avec le pistolet à air comprimé.

2.2 Minéralogie

2.2.1 Broyage

Les roches sont d'abord broyées grossièrement afin d'obtenir de petits morceaux de roches d'environ 0.5 cm de côté pouvant être ensuite insérés dans la broyeuse à agate afin d'obtenir une poudre.

Ne pas oublier de mettre en marche la hotte durant toutes ces manipulations.

- Prendre un morceau assez important de l'échantillon et le poser dans la broyeuse.
- Mettre le sachet d'échantillonnage dans le bac sous la broyeuse afin de récupérer les morceaux.
- Enclencher la broyeuse et attendre que l'échantillon soit totalement broyé (si des morceaux ne passent pas, utiliser le morceau de métal à côté de la broyeuse mais pas vos doigts !)
- Récupérer le sachet et nettoyer la broyeuse avec le pistolet à air comprimé, la brosse métallique et l'alcool. (la mâchoire se retire pour être facilement nettoyée)
- Une fois tous les échantillons broyés, balayer la salle.

Pour obtenir la poudre de roche nécessaire aux analyses minéralogiques de la roche totale et aux analyses rock-eval, il faut broyer plus finement les morceaux obtenus.

- Mettre l'équivalent d'une cuillère à café d'échantillon dans le mortier.
- Refermer celle-ci et la poser sur le « vibreur » sans oublier de l'assurer avec la sangle.
- Enclencher le « vibreur » et attendre environ 30 secondes. (le temps d'attente dépend de la roche)
- Préparer une feuille de papier pliée par la moitié et verser le contenu de la broyeuse sur cette feuille avant de vider la poudre dans le tube à échantillonner.
- Nettoyer le mortier à l'eau et le sécher avec le pistolet à air comprimé, sinon la poudre va coller. (Après avoir nettoyé à l'eau, mettre un peu d'alcool pour accélérer le séchage).
- Répéter l'opération avec les échantillons suivant et une fois terminé, sécher les mortiers et balayer la salle.

2.2.2 Poudres désorientées

Pour pouvoir analyser le contenu minéralogique des échantillons par rayons X, la poudre doit ensuite être passée sous une presse afin d'obtenir une fine lentille.

- Préparer quelques « confettis » en papier grâce au burin et au marteau à côté de la broyeuse.
- Enclencher la hotte de la presse et enclencher la presse.
- Mettre un « confetti » entre les tétons et poser, à l'envers, un anneau numéroté par-dessus avant de mettre le « couvercle ».
- Faire glisser le tout sous la presse en tirant sur la poignée.

- Presser en même temps sur les 2 boutons verts pour faire descendre la presse. Attendre environ 10 secondes avant de la faire remonter.
- Récupérer délicatement l'anneau maintenant rempli par une fine lentille.
- Mettre le papier à la poubelle et nettoyer la presse avec le pistolet à air comprimé et l'alcool entre chaque échantillon.
- Apporter les pastilles à Thierry pour l'analyse RX de la roche totale et ne pas oublier de balayer la salle.

2.2.3 Minéralogie des argiles, préparations orientées

Pour pouvoir étudier le contenu argileux des échantillons par rayons X, les carbonates doivent être éliminés afin d'obtenir une meilleure analyse. Voici la marche à suivre pour préparer 8 échantillons.

Décarbonatation

- Allumer la hotte et préparer 8 ballons à 2 cols sur leur support noir (se trouvent dans la machine à laver la vaisselle).
- Préparer le bac à ultra-son (le remplir d'eau) et son trépied.
- Mettre 3 cuillères à café d'échantillon broyé grossièrement dans les ballons.
- Mouiller les fragments avec de l'eau désionisée. (bouteille jaune et robinet à pastille blanche)
- Remplir 8 flacons en plastique de 200 ml jusqu'au trait supérieur avec de l'acide chloridrique. (Bouteille noir à droite dans la hotte)
- Verser la moitié de l'acide dans les ballons et brancher l'air (robinet).
- Passer chaque échantillon 3 minutes aux ultra-sons.
- Après 10 minutes environ (en sortant le 4^{ème} échantillon du bac à ultra-son), verser le reste de l'acide dans les ballons, toujours sous influence de l'air.

- *Durant les temps morts, commencer à nettoyer 16 verres de montres. Ils se trouvent dans de l'Ethanol sur les étagères au-dessus de la table de travail centrale.*
- *Noter au stylo indélébile une série de 8 verres avec le no de l'échantillon et <2 et une 2^{ème} série de 8 avec le no de l'échantillon et 2-16.*
- *Les poser sur la table en pierre (**face écrite contre la pierre**). Attention, il faut écrire sur la face ébréchée pour les verres abimés ou sur la face lisse pour les verres mats. Si les 2 faces sont trop ébréchées, le verre de montre peut être jeté à la poubelle.*
- *Préparer 3x8 petits godets en plastique avec le no de l'échantillon et <2, 2-16 et total sur le bouchon et le godet au stylo indélébile.*

- Après les 20 minutes à l'air et les 3 minutes aux ultra-sons, les ballons sont remués et vidés. Le résidu soluble est versé dans le flacon en plastique de 200 ml et le résidu insoluble passe à l'évier (via un seau de décantation)

Lavage de l'acide

Une fois les échantillons décarbonatés, il faut les laver par centrifugation.

- La centrifugeuse vers la fenêtre est très délicate et il faut peser les flacons de 200 ml avec les gobelets bleus de la centrifugeuse au 1/10 de gramme près en les complétant avec de l'eau désionisée.
- Régler le timer sur 5 minutes, 2700 t/min et presser le bouton start.
- Durant ces 5 minutes, rincer les ballons plusieurs fois et les mettre dans la machine à laver la vaisselle avec leur support. Vider et sécher le bac à ultra-son et nettoyer les becs à air.
- Après les 5 minutes, sortir les flacons et vider l'acide dans l'évier, en prenant garde à ce que le fond ne se décolle pas.
- Remplir le flacon à moitié avec de l'eau distillée et secouer pour décoller le fond. (Les bouchons sont dans le dernier tiroir en face de l'évier ; les nettoyer entre chaque échantillon)
- Compléter au trait supérieur avec de l'eau désionisée et repeser au 1/10 avec les gobelets bleus.
- Il faut maintenant continuer à centrifuger jusqu'à ce que les échantillons se troublent (particules en suspension) en réglant la centrifugeuse sur 11 minutes, 2700 t/min.
- Les opérations des 4 points précédents sont souvent répétées 2 à 3 fois.

- *Préparer 2x4 éprouvettes et leurs bouchons dans les blocs noirs situés sur l'étagère du bloc central.*
- *Sortir la seringue du tiroir et remplir 2 grand béccher avec de l'eau désionisée.*

- Quand l'échantillon est trouble, verser le liquide trouble dans l'évier, ajouter de l'eau désionisé jusqu'au tiers inférieur, secouer pour décoller, verser dans l'éprouvette jusqu'au trait supérieur et dans le godet en plastique « total ».

Séparation des fractions <2 μ m

La séparation des fractions souhaitées, par centrifugation, se fait à l'aide de la centrifugeuse à gauche de la table en pierre. Il faudra centrifuger les échantillons 4x durant 1'28'' à 1000 t/min. Pour lancer les centrifugations, il faut mettre le chrono sur 1'28'' et l'enclencher, mettre à fond la « speed control », puis réduire la puissance pour rester à 1000 t/min. A la fin, mettre sur OFF et à fond avec la « speed control » (frein moteur).

- Après la 1^{ère} centrifugation, plonger la seringue jusqu'au trait inférieur de l'éprouvette et pomper les fractions <2 μ m.
- Remplir le godet en plastique « <2 » et couler la fin de la seringue sur le verre de montre correspondant à l'échantillon <2.
- Entre chaque échantillon, rincer 2x la seringue dans le premier béccher et 1x dans le deuxième.
- Boucher les éprouvettes avec les bouchons (utiliser un bouchon par échantillon, ne pas mélanger) et secouer pour décoller le fond.

- Compléter avec de l'eau désionisée jusqu'au trait supérieur et centrifuger une 2^{ème} fois.
- Pomper la moitié supérieure de l'éprouvette avec la pompe à vide, secouer pour décoller, compléter avec de l'eau désionisée jusqu'au trait supérieur et centrifuger une 3^{ème} fois.
- Répéter le point précédent. (centrifuger une 4^{ème} fois)
- Pomper la moitié supérieure de l'éprouvette avec la pompe à vide et directement compléter les éprouvettes avec de l'eau désionisée.

Séparation des fractions 2-16 µm

La méthode de séparation pour les fractions 2-16 µm est particulière puisqu'il faut mettre en solution toutes les fractions restant dans l'éprouvette (c'est-à-dire les >2 µm) et attendre 2'54'' avant de les pomper. Après ce laps de temps, les fractions >16 µm seront décantées. Une méthode particulière a été développée durant laquelle on aspire toutes les minutes paires + 06'' et on secoue toutes les minutes impaires rondes.

- Régler le chronomètre sur 17 minutes.
- Secouer la 1^{ère} éprouvette jusqu'à ce qu'il n'y ait plus rien de collé au fond. Au moment de la poser, déclencher le chronomètre.
- A 16', ne rien faire.
- A 15', finir de secouer la 2^{ème} éprouvette.
- A 14'06'', pomper la 1^{ère} éprouvette, remplir le godet en plastique « 2-16 », couler le verre de montre, rincer la seringue 2x dans le 1^{er} bécher et 1x dans le 2^{ème}.
- A 13', finir de secouer la 3^{ème} éprouvette.
- A 12'06'', pomper la 2^{ème} éprouvette, remplir le godet en plastique « 2-16 », couler le verre de montre, rincer la seringue 2x dans le 1^{er} bécher et 1x dans le 2^{ème}.
- Etc, etc...
- A 1', il n'y a plus rien à secouer.
- A 0'06'', pomper la dernière éprouvette, remplir le godet en plastique « 2-16 », couler le verre de montre, rincer la seringue 2x dans le 1^{er} bécher et 1x dans le 2^{ème} et arrêter le chronomètre qui sonne.
- Laisser les verres de montre sécher avant de les déplacer et de les passer dans la machine à RX.

2.3 Détermination de la matière organique

2.3.1 Pyrolyse Rock-eval

La pyrolyse Rock-eval fournit d'une façon rapide, différentes informations sur le contenu organique des roches. Les échantillons réduits en poudre (cf p.XIV) sont chauffés par paliers durant cette analyse.

- Prendre le cahier et les différents ustensiles nécessaires à l'enregistrement des échantillons (spatule, pince, standards et « entonnoir » en métal) dans la salle « carbone ».
- Saisir le support des petits cylindres **sans toucher ceux-ci à la main**. (toujours utiliser la pince !)
- Aller dans la salle des balances après avoir nettoyé les cylindres à l'air comprimé. (robinet dans le labo des argiles)
- Poser la pièce de métal avec le téton et mettre un cylindre dessus. Couvrir avec l'« entonnoir » et utiliser la spatule pour remplir le cylindre.
- Peser 70 mg de *ifp160000* et le mettre à la 1^{ère} place.
- Nettoyer la spatule et l'« entonnoir » entre chaque manipulation.
- Peser 70 mg de *ifp160000* et le mettre à l'antépénultième place.
- Peser 70 mg de *vp143h* et le mettre à la 2^{ème} place.
- Peser 70 mg de *vp143h* et le mettre à l'avant dernière place.
- La dernière place est un blanc (cylindre vide)
- Peser ensuite entre 50 et 65 mg de chaque échantillon.
- Nettoyer la balance avec le pinceau et apporter le support avec les cylindres (sans les toucher !) ainsi que le cahier rempli à la salle « carbone ».
- Les échantillons peuvent maintenant être analysés.

2.4 Analyses géochimiques à l'ICP-MS

2.4.1 Minéralisation

On utilise généralement 250 mg de poudres de roche préparées durant l'analyse minéralogique (cf p.XIV). Pour cette étude, on a broyé environ 200 mg des échantillons préalablement lavés avec du Deconnex, afin d'éliminer une partie des résidus.

L'analyse ICP-MS permet de quantifier précisément différents éléments, il est donc important de travailler de manière très propre. Une solution minéralisée des échantillons est nécessaire pour analyser les éléments présents dans ceux-ci.

Pesée

9 échantillons peuvent être préparés chaque fois. La position 10 correspond au blanc.

- Récupérer 10 bombes blanches, 10 bouchons, 1 filtre en plastique et 1 spatule dans la salle blanche. Les transporter dans le bac en plastique avec le couvercle bleu.

Avant d'entrer dans la salle blanche, enlever ses chaussures, entrer dans le sas et mettre des chaussons, un « bonnet » et une blouse.

- Récupérer les 10 portes bombes numérotés dans la salle du micro-onde.
- Prendre aussi une pissette d'eau ultra pure, le bac vert pour récupérer l'eau lors du lavage de la spatule et préparer des lingettes pour poser et essuyer la spatule.
- Prendre les bombes par l'extérieur, ne jamais toucher à l'intérieur !
- Peser entre 249,5 et 250,5 mg d'échantillon pour les 9 échantillons. L'échantillon 1 a un bouchon spécial qui permettra plus tard d'insérer une sonde de température.
- Nettoyer la spatule au-dessus du bac après chaque utilisation.

Mise en solution

- Poser ensuite les portes bombes (contenant les bombes) sous la hotte de la salle du micro-onde.
- Enclencher la hotte sur la position 2, mettre des gants et une blouse.
- Régler le bouchon doseur « Merck Optifix » de la bouteille d'acide nitrique à 65% sur 10 ml, poser une serviette sous le doseur pour éviter de faire des taches sur le plan de travail.
- Prendre les bombes en les enlevant de leur porte bombe et mettre 10 ml d'acide nitrique dans chacune avant de les ranger à nouveau dans leur porte bombe. Pour ce faire, mettre la bombe sous le doseur, soulever le doseur et le laisser redescendre tout seul.
- A la fin de l'opération, refermer le doseur.
- Mettre les bombes sur le carrousel en rajoutant les bouchons bruns supplémentaire et serrer une première fois avec la clé (bouchon spécial pour la bombe 1).
- Serrer mieux à la fin, mais sans forcer ! Poser le cercle autour des bombes.

Minéralisation au micro-onde

- Allumer le four à micro-onde et l'ordinateur et lancer le programmes « easy wave ».

Méthode → ----- → EPA 3501

- Insérer la sonde dans l'échantillon n° 1.
- Mettre le carrousel dans le four et brancher la sonde à la place du cache en haut à gauche.

Dans le programme → MW Programs → Mettre 1000 watts pour les deux premiers échantillons → Start → Ne pas activer la « Twist control » → Ensuite YES pour la température → Attendre jusqu'à la fin et ne pas sauver en fermant le programme.

- Tout éteindre.
- Sortir le carrousel du four, enlever la sonde et laisser refroidir.
- Pendant que les bombes refroidissent, préparer pour la filtration et mettre les filtres qui ont passé une nuit au four dans le dessiccateur (éventuellement peser les filtres qui se trouvent dans le dessiccateur depuis quelques jours).

Filtration

- Noter le n°, le n° d'échantillon, le n° GEA et la date sur 10 bouteilles de 100 ml (salle des balances).
- Peser les 10 flacons vides de 100 ml avec le bouchon.
- Prendre 10 boîtes de pétris (salle micro-onde) et noter le n° et le n° d'échantillon.
- Prendre une boîte de filtre type HVLP 0,45 µm.
- Aller dans la salle de l'ICP-MS, remplir les pissettes d'eau ultra pure et prendre une pince.
- Sous la hotte, mettre des serviettes sous le « filtreur » et sur la gauche du plan de travail.
- Rincer le « filtreur » à l'eau ultra pure.
- Mettre le joint dans le filtre récupéré dans la salle blanche et le poser entre les deux récipients du « filtreur ».
- Desserrer les bombes sous la hotte de la salle du micro-onde et les amener sous la hotte de la salle ICP-MS.
- Enlever le cercle et le laver au robinet.
- Prendre un papier filtre avec la pince, le poser sur le filtre en plastique et refermer visser le « filtreur ».
- Mettre le tuyau de la pompe dans trou se situant à droite de la ligne témoin du « filtreur ». Boucher l'autre orifice.
- Remplir avec un peu d'eau ultra pure et enclencher la pompe.

Pour arrêter la pompe, enlever d'abord le tuyau délicatement pour ne pas trop remuer le filtrat à cause de la différence de pression.

- Arrêter la pompe
- Vider le filtrat dans l'évier.

- Réenclencher la pompe sans oublier d'avoir remis le tuyau, ouvrir la première bombe au-dessus du filtre, filtrer la solution en prenant garde de tout récupérer, rincer le bouchon et les bords du « filtreur ». Remplir le réceptacle jusqu'à la ligne témoin.

Attention à ne pas toucher les différents récipients avec le bec de la pipette car celui-ci peut être contaminé de différents éléments.

- Arrêter la pompe, récupérer le papier filtre en touchant les bords propres avec la pince et le mettre dans une boîte de pétris.
- Rincer la bouteille 1 à l'eau ultra pure et verser le filtrat dans celle-ci par le trou opposé à celui du tuyau de la pompe.
- Rincer le réceptacle afin de récupérer tous les ions et remplir la bouteille.
- Rincer 3 fois le filtre en plastique, les récipients, le bouchon et la pince à l'eau ultra pure.
- Répéter ces opérations pour tous les échantillons, même le blanc.
- Mettre l'eau ultra pure du filtrage préalable dans la bombe précédente afin d'aider à son nettoyage et d'éviter d'aller jusqu'à l'évier.
- A la fin des manipulations, mettre les filtres dans le four de la salle du micro-onde durant une nuit, puis les mettre dans le dessiccateur avant de les peser.
- Peser les flacons pleins.
- Nettoyer les portes bombes et les bouchons bruns à l'eau du robinet et les laisser sécher dans la salle du micro-onde.
- Nettoyer le « filtreur » à l'eau ultra pure et le laisser sécher sous la hotte, sur une serviette.
- Nettoyer les bombes et les bouchons avec de l'eau désionisée et la brosse « allongée ». Eviter de les rayer avec le manche en métal de la brosse. Mettre dans le bac en plastique.
- Nettoyer la spatule, la pince et le filtre en plastique avec de l'eau désionisée et les mettre dans le bac également.
- Amener le bac dans la salle blanche pour terminer le nettoyage.

2.4.2 Statistiques

Les données utilisées sont celles qui ont été normalisées par K. Les éléments comparés dans cette étude statistique sont V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, U. Un tableau contenant ces données centrées réduites et le nom des éléments dans la première ligne est construit dans Excel.

Marche à suivre dans Matlab 7.0

- Ouvrir Matlab 7.0
- Importer les données centrées réduites (élément : « colheaders », matrice : « DCRdata »)
- Calculer la matrice de corrélation (variables entre elles) :
Corr=CORRCOEF(DCRdata);
- Créer une figure vide :
figure

- Montrer la figure « Corr »
imagesc(Corr);
- Calculer la matrice des vecteurs propres et des valeurs propres :
[V,la]=eig(Corr);
- Construire la matrice rCP (matrice de corrélation entre les variables et les axes de l'ACP (composantes principales)) :
Da=sqrt(diag(la));
*w=ones(12,1)*Da';*
*rCP=w.*V;*
figure
imagesc(rCP);
- Déterminer le pourcentage de variance expliquée grâce aux composantes principales :
Coefbis=flipud(diag(la));
NCoefbis=cumsum(Coefbis./12);
*NCoefbis=cumsum(Coefbis./12)*100;*
- Construire le cercle de corrélation des composantes 1 et 2 (1 et 3 ; 1 et 4 ; 2 et 4 ; 3 et 4) :
*CP=DCRdata*V;*
*x=0:0.1:2*pi;*
xi=sin(x);
yi=cos(x);
figure
plot(xi,yi);
hold on
axis square
plot([0 0],[-1 1]);
plot([-1 1],[0 0]);
plot(rCP(:,12),rCP(:,11),'.r'); (... *plot(rCP(:,12),rCP(:,10),'.r');* ...)
- Mettre le nom des elements :
gname(colheaders)
- Importer une colonne contenant le nom des échantillons (renommé « Echant »)
- Voir le nuage de points (échantillons) selon les composantes 1 et 2 (1 et 3...) et renommer les points par le nom des échantillons :
figure
plot(CP(:,12),CP(:,11),'.r'); (... *plot(CP(:,12),rCP(:,10),'.r');* ...)
gname(Echant)

2.5 Etude du phosphore

2.5.1 Préparation des échantillons

- Préparer une liste avec 23 numéros et noter le nom de l'échantillon correspondant à chaque numéro. (21 échantillons, 1 échantillon à double, 1 blanc)
- Comme l'encre brûle dans le four, graver 23 petites bouteilles en verre. Utiliser donc un système simple (ex : 1,2,3 ou a,b,c...). S'il n'y a pas de graveur, noter la place de chaque bouteille dans le four afin de ne pas mélanger les bouteilles à la sortie du four.
- Peser 100 mg (+/- 5 mg) de poudre de roche préparée durant l'analyse minéralogique (cf p.XIV) pour chaque échantillon et laisser la bouteille du blanc vide (23^{ème}).
- Une fois terminé, mettre 1000 µl (1ml) d'une solution 50/50 (moitié/moitié) de MgNO₃ (nitrate de manganèse) et H₂O (eau désionisée) dans chaque bouteille à l'aide d'une pipette automatique à volume réglable se trouvant dans la salle ICP-MS. S'assurer que tout le sédiment est recouvert par la solution.
- Laisser les bouteilles ouvertes et les couvrir avec un bouchon de papier d'aluminium afin que l'humidité puisse s'échapper.
- Laisser s'évaporer durant une nuit dans le four de la salle du micro-onde. Les couvrir avec une serviette.
- Le lendemain, allumer et régler le four dans la salle de sciage sur 150°C. Laisser préchauffer durant 30 minutes.
- Régler ensuite sur 550°C et insérer les bouteilles avec leurs bouchons d'aluminium durant 2h30 dans le four. Noter la place de chacune si elles n'ont pas été gravées.
- A la fin de ce temps, arrêter le four, ouvrir la porte et retirer un peu la plaque. Laisser refroidir durant 1h.
- Retirer ensuite complètement la plaque et la poser sur le morceau de pierre à la droite du four (pas sur du bois !). Faire attention, car les bouteilles sont sans doute encore chaude.
- Renommer les bouteilles si elles ne sont pas gravées.
- Préparer le bac à ultrason.
- Mettre 10 ml de HCl 1N dans chaque bouteille et les refermer avec les bouchons en plastique en notant les numéros sur ceux-ci.
- Passer les bouteilles quelques minutes aux ultrasons afin de dissoudre totalement les sédiments.
- Mettre les bouteilles dans un carton quadrillé et le mettre sur l'agitateur.
- Régler l'agitateur sur 200 t/min et laisser les échantillons se mélanger durant 16 heures minimum.
- Arrêter l'agitateur et préparer le matériel pour la filtration.
- Sortir les seringues stérilisées de 10 ml et les filtres pour seringues, numéroter des petites bouteilles en plastique, prendre un petit bécher.
- Prendre la bouteille en verre contenant l'échantillon, aspirer la solution avec la seringue en laissant le résidu sur le fond.
- Mettre un filtre et passer 2 ou 3 gouttes dans le bécher afin de nettoyer le filtre.

- Passer la solution en récupérant le filtrat dans la bouteille en plastique correspondante.
- Changer la seringue et le filtre pour chaque échantillon.
- Nettoyer le bécher et mettre les bouteilles à laver.
- Ranger les bouteilles en plastique à l'abri de la lumière jusqu'à ce que toutes les séries d'échantillons aient été préparées.

2.5.2 Mesure du phosphore

- Allumer le spectrophotomètre ~1h avant de l'utiliser afin que la lampe chauffe. Préparer les échantillons pendant ce temps.
- Préparer une nouvelle série de bouteilles en plastique en utilisant la numérotation 1/10, 2/10, ..., 23/10.
- Aller dans la salle blanche et diluer 10x les échantillons dans les nouvelles bouteilles en utilisant l'appareil sous la hotte dans la deuxième salle. Mettre l'appareil en marche, choisir le programme 24 (dilution 10x) et rincer plusieurs fois avec de l'eau désionisée avant de commencer.
- Stocker les échantillons au frigo ou les analyser immédiatement.
- Mettre 3.3 ml de la solution diluée 10x dans les verres du spectrophotomètre à l'aide de la pipette automatique dans la salle du spectrophotomètre.
- Mettre 3.3 ml de solution du standard PO_4 (dans du HCl 0.1 M) dans six verres du spectrophotomètre. On prend 6 standards à 1, 2.5, 5, 10, 15 et 20 μM .
- Ajouter 0.1 ml de « mixing reagent » dans tous les 23+6 verres du spectrophotomètre. (tip 2.5 ml, position 2, pousser 1x)
- Ajouter 0.1 ml d'acide ascorbique dans tous les verres en commençant par les standards (même méthode).
- Bien agiter les solutions avec des embouts jaunes.
- Préparer le cahier de spectrophotométrie et le masque pour le calcul des résultats.
- Remettre le spectrophotomètre à 0 (autozéro).
- Mesurer l'absorbance du verre 10% et la noter dans le cahier.
- Entrer l'échantillon « blanc » dans la machine et mettre la machine à zéro sur cet échantillon.
- Mesurer les standards pour établir une courbe de calibration et entrer les mesures dans la maquette.
- Mesurer tout les échantillons et entrer les absorbances (et les autres données) dans la maquette de calcul.
- Remesurer les standards pour contrôler le shift de la machine.
- Contrôler, s'il y a des échantillons qui dépassent l'absorbance du standard 20 μM .
→ Si oui: refaire ces échantillons à partir du en les diluant avec du HCl 0.1 M (par exemple: 1.1 ml + 2.2 ml du HCl = dilution de 3x).
- Ensuite corriger les résultats en conséquence.
- Entrer le reste des données dans le cahier de spectrophotométrie.

ANNEXE 3

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Minéralogie

Roche totale (CPS)

CPS		Position	Décalage	Phyllo	Quartz	FK	Plg	Calcite	Dolomite	Ankérite
RT		(cm)		19.8	26.65	27.5	27.9	29.43	30.8(.9)	30.7
22144	J80	1150	0.03	33	1208	13	98	1504	26	17
22145	J79	1128	-0.05	38	1103	14	29	1491	27	20
22146	J78	1108	0.05	39	1146		29	2002	23	17
22147	J77	1090	0.06	30	1067		59	2001	68	1
22148	J76	1068	-0.02	31	1187		53	1772	42	10
22149	J75	1046	0.01	30	1355	12	15	1740	18	
22150	J74	1028	-0.1	24	1042		48	1393	73	15
22151	J73	1008	0.07	44	1089	5	25	1788	40	9
22152	J72	988	0.04	44	114		53	1899	75	
22153	J71	980	0.1	32	2580	6	96	1625	75	4
22154	J70	972	-0.12	41	1102		58	1438	23	14
22155	J69	962	0.05	25	1370	9	48	1774	43	
22156	J68	948	-0.03	28	991	2	77	1807	13	
22157	J67	928		32	1230	5	43	1535	25	7
22158	J66	908	0.03	22	1199	7	26	1518	27	
22159	J65	886	0.14	30	690		24	1493	18	4
22160	J64	868	-0.05	30	1038	6	42	1846	27	22
22161	J63	848	-0.08	38	960	4	35	1721	19	3
22162	J62	828	0.02	38	1339	4	130	1742	22	13
22163	J61	808	-0.1	41	1233	4	25	1809	11	
22164	J60	786	0.01	20	1210	2	73	1822	29	
22165	J59	768	0.17	26	1770	6	79	2186	30	10
22166	J58	749	0.04	46	1476		135	2128	29	
22167	J57	738	-0.07	43	1165	11	53	1305	42	11
22168	J56	732	0.02	24	1170	7	69	2079	38	
22169	J55	720	0.01	34	1114	3	38	1878	30	2
22170	J54	690	0.08	36	1018	3	47	1908	35	
22171	J53	666	0.15	40	1051		76	2077	23	3
22172	J53	664	-0.03	31	953	3	34	1603	33	5
22173	J52	648	-0.08	39	1037	2	119	1431	26	2
22174	J51	638	-0.03	24	837	11	80	1748	21	9
22175	J50	628	0.08	43	1245	11	50	1945	27	
22176	J49	608	0.02	27	870		42	1837	40	
22177	J48	393	0.03	26	1033		67	2162	36	6
22178	J47	370	0.09	38	937		49	1141	34	15
22179	J46	352	0.03	54	1266	9	63	2031	253	
22180	J45	332	-0.01	29	841	12	23	1585	38	
22181	J44	314	0.14	23	1302		70	1641	29	
22182	J43	304	-0.02	42	1689	17	89	1694	83	14
22183	J42	296	0.08	24	1190	2	67	2112	63	4
22184	A6	288	0.08	52	1527	3	84	1715	47	
22185	A5	283	-0.07	38	1796	8	153	453	79	4
22186	A4	280	0.05	29	991		33	2025	33	
22187	A3	274	-0.02	20	1051	11	75	1851	63	4
22188	A2	269	0.12	42	896	4	20	1676	36	13
22189	A1	261	0.09	47	930		56	1766	72	
22190	I41	256	-0.02	22	863		24	2498	50	3
22191	I40	254	-0.03	29	766	13	51	2549	39	12
22192	I39	244	0.05	25	583	2	11	1957	30	16
22193	I38	234		36	647	4	47	1954	39	
22194	I37	223	0.08	28	662	7	21	2521	59	

22195	I36	210	0.12	29	749	6	28	2512	20	
22196	H36	210	-0.11	20	600		52	2065	33	
22197	H35	203	-0.05	39	1136		73	2135	46	
22198	H34	199	-0.02	24	722	5	16	2384	43	3
22199	H33	194	-0.02	23	692	10	34	2366	20	6
22200	H32	189	0.11	29	782	12	38	2111	68	
22201	H31	184	0.01	19	507	6	26	2064	72	13
22202	H30	178	-0.04	14	643		38	2570	21	6
22203	H29	173	-0.05	22	565		30	2722	22	5
22204	H28	168	0.07	23	355	3	69	1899	45	8
22205	H27	164	0.01	25	657		37	2249	21	
22206	H26	159	-0.09	26	343		20	2113	29	13
22207	H25	156	-0.07	37	808		49	1710	48	3
22208	H24	155	-0.05	13	480	11	34	2359	56	6
22209	H23	153	0.05	36	556	4	40	2600	16	
22210	H22	151	-0.06	18	493	4	22	2466	6	
22211	H21	149	0.1	20	469		56	3058	7	2
22212	H20	147	0.05	16	385	7	46	2806	20	2
22213	H19	145	0.05	18	339		8	2226	10	5
22214	H18	143	0.01	21	423		28	2646	31	
22215	H17	141	-0.06	25	343		26	2303	24	
22216	H16	139	0.01	22	647		26	2363	27	4
22217	H15	137	0.07	28	1038	3	44	2202	115 ?	
22218	H14	135	0.03	37	605	10	25	2573	54	3
22219	H13	133	0.05	33	972	5	37	1915	46	4
22220	H12	130	-0.13	15	582	2	26	2082	14	
22221	H11	128	0.02	28	637	4	27	2573	58	10
22222	H10	127	0.02	38	963	2	40	2178	60	
22223	H9	126	0.13	25	895		21	2012	27	8
22224	H8	124	0.06	27	809	3	26	1884	23	7
22225	H7	122	-0.03	25	736	9	62	2138	16	
22226	H6	120	-0.06	45	870		46	2111	31	
22227	H5	118	-0.04	20	504		25	2464	16	
22228	H4	116	0.06	56	1001	13	47	4609	27	8
22229	H3	114	-0.17	32	1017		33	4013	35	4
22230	H2	111	0.04	43	1763	8	82	5112	43	
22231	H1	109	-0.02	43	985	3	43	4893	33	6
22232	E1	108	-0.08	64	1206	5	36	3075	16	15
22233	E2	107	-0.02	91	1650	22	71	2957	26	3
22234	E3	106	-0.11	59	1707		63	2801	29	2
22235	F1	108	0.02	53	2083	7	54	3150	5	
22236	F2	107	-0.06	104	2249	8	88	2518	16	10
22237	F3	106	-0.06	82	1968	15	46	2581	16	3
22238	F4	105	-0.05	46	1207		52	4340	25	13
22239	F5	107	0.12	33	668	1	26	3891	27	9
22240	F6	104	-0.02	50	1141		22	4919	124	8
22241	F7	102	0.02	36	1013		30	4986	98	15
22242	F8	100	-0.18	33	873		42	3918	30	
22243	F9	98	0.04	40	1155	586 ?	27	5432	60	
22244	F10	96	-0.1	30	794		14	4890	19	16
22245	F11	94	-0.08	18	987	8	68	5086	67	13
22246	F12	92	-0.11	23	1702		43	5433	44	
22247	F13	91	-0.06	46	907	7	90	4723	260	1
22248	F14	89	-0.02	42	1373	6	46	5382	38	95
22249	F15	87	0.02	46	1535	2	86	5182	298	
22250	F16	85	-0.02	21	3664	9	29	5410	64	
22251	F17	83	0.02	44	1016		39	4491	40	9
22252	F18	81	0.01	44	1532		64	5126	72	
22253	F19	79	0.04	55	1370		32	5165	35	
22254	F20	77	0.04	52	1400		37	4799	49	8
22255	F21	76	0.24	52	1441		134 ?	5170	55	2
22256	F22	74	-0.05	36	1346		77	5874	218	2
22257	F23	72		16	1375	6	36	5050	33	2
22258	F24	70	-0.19	30	1113	9	29	4798	37	10
22259	F25	68	-0.11	25	1363	9	46	4827	70	17
22260	F26	66		15	1097	24	103	5222	344	
22261	F27	64	-0.07	32	1368	3	16	4314	177	17
22262	F28	62	-0.13	45	936		90	4457	30	
22263	F29	60	-0.08	37	1039		9	5527	115	6
22264	F30	58	-0.07	49	1023		28	4947	85	
22265	F31	56	-0.09	29	867	1	35	4182	71	
22266	F32	54	0.05	50	2112	7	40	4378	119	15
22267	F33	53	0.05	66	1762	2	108	5344	30	
22268	F34	49	-0.14	37	1682	3	46	4297	24	7
22269	G34	49	0.01	28		7	52		77	
22270	G35	44	-0.19	36	947		16	4515	50	27
22271	G36	39	-0.07	47	1342		28	5252	22	
22272	G37	34	-0.05	70	1456	8	44	4686	39	17
22273	G38	29	-0.17	45	1108		19	4700	22 96 ?	5
22274	G39	24	-0.09	25	1257	18	26	5015	46	
22275	G40	20	-0.05	35	1263	8	16	5324	39	19
22276	G41	16	0.02	39	1053	5	36	5703	26	
22277	G42	10	-0.12	23	740	1	11	4461	46	8
22278	G43	5	0.03	49	1085		15	4986	24	
22279	G44	0		46	1251	8	35	5003	17	6

Roche totale (Normalisation à 100%)

Samples	Position	Phyllosilicate	Quartz	Feldspath-K	Plagioclase-N	Calcite	Dolomite	Ankérite	Indosés
J80	1150	17.21	19.83	0.72	4.21	44.82	0.82	0.22	12.17
J79	1128	19.93	18.22	0.78	1.25	44.7	0.86	0.26	13.99
J78	1108	21.44	19.76	0	1.38	56	0.8	0.25	0.38
J77	1090	16.22	18.29	0	2.81	60.08	2.37	0.01	0.21
J76	1068	17.02	20.52	0	2.39	53.11	1.4	0.14	5.42
J75	1046	16.34	23.24	0.7	0.67	51.75	0.59	0	6.71
J74	1028	13.27	17.89	0	2.06	44.89	3.03	0.19	18.67
J73	1008	24.33	18.97	0.29	1.14	52.76	1.34	0.12	1.04
J72	988	25.31	2.07	0	2.53	59.61	2.62	0	7.87
J71	980	16.52	32.74	0.33	3.89	43.12	2.35	0.05	1
J70	972	21.24	19.45	0	2.48	42.34	0.72	0.18	13.59
J69	962	13.67	23.58	0.52	2.16	52.94	1.43	0	5.69
J68	948	15.49	17.26	0.12	3.51	54.56	0.44	0	8.62
J67	928	16.82	20.35	0.28	1.86	44.02	0.8	0.09	15.77
J66	908	12.54	19.82	0.39	1.13	45.67	0.86	0	19.6
J65	888	18.45	13.46	0	1.05	48.17	0.58	0.05	18.24
J64	868	16.79	18.29	0.36	1.94	56.38	0.92	0.31	5.02
J63	848	20.79	16.53	0.23	1.58	51.4	0.63	0.04	8.8
J62	828	19.06	22.12	0.23	5.8	50.78	0.72	0.18	1.11
J61	808	22.19	21.25	0.24	1.14	54.56	0.37	0	0.25
J60	786	11.05	21.04	0.12	3.32	54.95	0.97	0	8.55
J59	768	12.46	27.35	0.38	3.12	55.34	1.07	0.15	0.14
J58	749	23.67	24.97	0	4.89	45.43	1.02	0	0.02
J57	738	21.75	18.54	0.59	2.21	39.65	1.29	0.14	15.83
J56	732	13.95	19.4	0.43	3.01	61.34	1.34	0	0.53
J55	720	19.08	19.68	0.18	1.76	57.51	1.02	0.03	0.76
J54	690	20.34	18.11	0.18	2.19	57.87	1.2	0	0.11
J53	666	22.1	17.67	0	3.24	55.89	0.81	0.04	0.24
J53'	664	17.61	17.07	0.17	1.5	47.34	1.07	0.07	15.17
J52	648	22.08	16.81	0.11	5.05	42.78	0.81	0.03	12.33
J51	638	15.34	15.49	0.64	3.63	53.46	0.7	0.12	10.61
J50	628	21.45	20.19	0.66	2.34	54.37	0.93	0	0.06
J49	608	15.11	15.33	0	1.94	56.1	1.36	0	10.17
J48	393	14.02	17.28	0	2.98	64.17	1.29	0.09	0.17
J47	370	20.8	16.6	0	3.02	40.82	1.02	0.19	17.55
J46	352	25.98	21.95	0.55	2.76	42.84	5.84	0	0.08
J45	332	16.38	16.17	0.68	1.02	50.87	1.23	0	13.64
J44	314	12.26	21.86	0	3.08	47.75	0.94	0	14.11
J43	304	21.09	25.89	0.97	3.07	46.12	2.43	0.19	0.24
J42	296	14.04	19.34	0.12	2.87	61.45	2	0.06	0.11
A6	288	24.34	23.64	0.17	3.23	47.12	1.45	0	0.05
A5	283	18.49	24.27	0.37	5.41	39.56	2.06	0.04	9.81
A4	280	16.78	18.06	0	1.57	60.56	1.16	0	1.87
A3	274	11.16	18.46	0.65	3.45	56.37	2.13	0.06	7.72
A2	269	22.87	15.37	0.23	0.9	49.82	1.19	0.18	9.44
A1	261	25.9	16.13	0	2.54	52.67	2.39	0	0.36
I41	256	15.63	18.35	0	1.26	63.2	1.45	0.05	0.06
I40	254	15.75	14.59	0.9	2.72	64	1.53	0.19	0.32
I39	244	14.45	10.61	0.12	0.52	61.77	1.05	0.23	11.24
I38	234	20.68	11.71	0.24	2.23	61.27	1.36	0	2.51
I37	223	16.05	12.44	0.48	0.98	68.01	2.03	0	0.01
H/136	210	14.68	12.61	0.21	1.99	65.77	0.98	0	3.78
H35	203	20.92	19.02	0	3.53	54.74	1.64	0	0.16
H34	199	15.02	14.23	0.33	0.83	66.45	1.63	0.05	1.45
H33	194	13.21	12.13	0.66	1.75	71.16	0.76	0.09	0.24
H32	189	16.14	13.56	0.76	1.85	65.18	2.44	0	0.08
H31	184	11.22	9.43	0.38	1.27	66.49	2.58	0.19	8.45
H30	178	9.11	11.18	0	2.04	76.67	0.83	0.1	0.07
H29	173	12.83	11.99	0	1.67	72.34	0.9	0.08	0.19
H28	168	13.15	8.39	0.18	3.25	59.29	1.56	0.11	14.05
H27	164	14.22	11.6	0	1.86	71.23	0.77	0	0.32
H26	159	15.55	6.46	0	0.99	68.97	1.05	0.19	6.79
H25	156	21.25	13.92	0	2.19	52.09	1.59	0.04	8.92
H24	155	7.13	8.45	0.73	1.7	79.43	1.78	0.09	0.68
H23	153	21.1	9.12	0.28	1.89	66.89	0.64	0	0.08
H22	151	11.5	9.92	0.27	1.16	76.53	0.23	0	0.38
H21	149	13.55	10.74	0	3.33	72.02	0.31	0.04	0.01
H20	147	11.01	8.34	0.51	2.61	76.16	0.83	0.03	0.49
H19	145	11	6.52	0	0.4	74.26	0.37	0.08	7.36
H18	143	12.95	7.85	0	1.53	75.07	1.25	0	1.35
H17	141	13.49	6.7	0	1.33	77.15	0.9	0	0.43
H16	139	12.72	11.7	0	1.34	71.43	1.02	0.06	1.73
h15	137	10.28	11.83	0.11	1.2	60.73	2.31	0	13.54
H14	135	19.24	11.05	0.7	1.27	65.47	1.99	0.05	0.24
H13	133	18.71	17.34	0.3	1.73	59.27	1.58	0.06	1.01
H12	130	8.85	10.82	0.13	1.27	67.07	0.5	0	11.37
H11	128	16.85	11.98	0.28	1.45	65.48	2.31	0.16	1.49
H10	127	19.36	17.09	0.13	1.97	56.38	2.17	0	2.91
H9	126	14.48	16.33	0	1	63.61	0.95	0.12	3.51

H8	124	15.29	14.42	0.18	1.21	58.9	0.79	0.1	9.11
H7	122	14.84	13.76	0.57	3.02	67.17	0.58	0	0.06
H6	120	22.52	15.14	0	2	59.26	1	0	0.08
H5	118	12.77	10.13	0	1.32	74.98	0.62	0	0.19
H4	116	14.34	8.07	0.35	0.99	64.42	0.42	0.05	11.35
H3	114	9.96	7.81	0	0.66	61.34	0.52	0.02	19.69
H2	111	11.4	14.71	0.23	1.79	70.23	0.69	0	0.95
H1	109	11.28	8.13	0.08	0.93	70.04	0.52	0.04	8.97
E1	108	15.34	8.61	0.12	0.67	53.23	0.22	0.09	21.73
E2	107	23.45	11.6	0.52	1.31	49.34	0.35	0.02	13.41
E3	106	16.78	11.86	0	1.15	45.56	0.39	0.01	24.26
F1	108	14.99	14.79	0.17	1	49.45	0.07	0	19.53
F2	107	22.42	15.21	0.18	1.56	42.34	0.21	0.05	18.02
F3	106	17.83	14.56	0.35	0.82	44.03	0.21	0.02	22.18
F4	105	11.5	9.5	0	1.07	59.2	0.38	0.08	18.27
F5	107	10.34	5.1	0.03	0.52	64.67	0.4	0.05	18.89
F6	104	13.14	9.44	0	0.48	70.54	1.98	0.05	4.38
F7	102	9.52	8.44	0	0.65	72	1.58	0.1	7.71
F8	100	11.56	7.66	0	0.84	58.9	0.44	0	20.6
F9	98	11.05	10.05	6.45	0.62	69.87	1	0	0.97
F10	96	8.89	6.57	0	0.3	71.34	0.3	0.11	12.48
F11	94	5.87	8.29	0.23	1.5	75	1.08	0.09	7.95
F12	92	7.28	12.74	0	0.97	77.86	0.73	0	0.42
F13	91	11.89	7.38	0.19	1.92	66.63	4.07	0.01	7.9
F14	89	11.5	9.54	0.18	1.04	76.23	0.63	0.65	0.24
F15	87	12	12.54	0.06	1.76	69.34	3.84	0	0.46
F16	85	5.63	24.01	0.26	0.64	67.43	1.04	0	0.99
F17	83	11.16	10.13	0	0.82	65.32	0.61	0.06	11.91
F18	81	11.71	12.84	0	1.4	71.23	1.16	0	1.66
F19	79	14.04	10.54	0	0.71	73.81	0.57	0	0.34
F20	77	13.48	11.43	0	0.79	67.92	0.77	0.05	5.56
F21	76	13.56	11.93	0	2.06	71.04	0.89	0.01	0.51
F22	74	7.04	11.67	0	1.81	75.89	2.78	0.01	0.79
F23	72	4.24	11.47	0.17	0.79	73.02	0.53	0.01	9.77
F24	70	7.8	9.11	0.25	0.62	68.1	0.58	0.07	13.47
F25	68	6.5	11.16	0.25	0.99	68.52	1.1	0.11	11.37
F26	66	4.04	9.31	0.69	2.29	76.77	5.62	0	1.29
F27	64	7.98	11.25	0.08	0.33	63.23	2.68	0.11	14.34
F28	62	11.93	8.44	0	1.87	62.45	0.46	0	14.85
F29	60	9.27	9.08	0	0.21	79.43	1.94	0.04	0.04
F30	58	12.91	8.49	0	0.61	71.14	1.36	0	5.5
F31	56	9.18	7.76	0.03	0.71	62.56	1.07	0	18.69
F32	54	12.44	16.54	0.19	0.82	59.45	1.79	0.09	8.67
F33	53	14.35	14	0.06	2.01	68.8	0.49	0	0.29
F34	49	10.17	13.13	0.08	0.94	60.34	0.36	0.04	14.94
G35	44	9.17	7.59	0	0.34	62.75	0.77	0.17	19.21
G36	39	12.19	11.04	0	0.62	75.26	0.36	0	0.53
G37	34	17.97	11.79	0.22	0.93	65.65	0.61	0.11	2.72
G38	29	10.1	8.07	0	0.41	61.46	19.08	0.03	0.85
G39	24	6.61	10.47	0.51	0.57	72.4	0.74	0	8.7
G40	20	9.52	10.81	0.23	0.36	78.07	0.64	0.13	0.23
G41	16	9.98	8.33	0.15	0.84	80.18	0.44	0	0.08
G42	10	7.84	6.91	0.03	0.23	67.3	0.71	0.05	16.93
G43	5	12.95	9.02	0	0.33	71.91	0.38	0	5.41
G44	0	12.15	10.41	0.23	0.76	72.13	0.27	0.04	4.01
moy totale		15.06	14.33	0.26	1.78	62.89	1.37	0.06	6.58
moy KT		12.29	11.22	0.25	1.28	67.15	1.18	0.05	6.59
moy arg		16.70	11.78	0.18	1.06	51.65	0.29	0.04	18.30
moy avant		10.00	10.86	0.32	1.05	69.45	1.43	0.06	6.83
moy après		14.36	11.41	0.20	1.60	67.31	1.06	0.04	4.04

Argiles <2µm (CPS)

CPS	2G	Position (cm)	Décalage	Smectite	Mica 001	IS	K001-C002	Mica 002	Goethite	Kaol 002	C004
				5.0 - 5.4	8.8 - 8.9	9.2	12.3	~17	21.2	24.9	25.1
22144	J80	1150	0.1	510	505	221	419	238	16	287	150
22151	J73	1008	0.17	782	625	242	398	163	8	225	42
22156	J68	948	-0.2	476	343	253	320	121	17	143	241
22161	J63	848	-0.1	369	295	185	289	104	37	149	127
22166	J58	749		521	427	179	369	190	11	160	125
22171	J53	666		636	447	233	407	198	16	154	156
22176	J49	608	-0.1	562	376	205	337	200	23	196	156
22177	J46	393	-0.15	281	243	151	222	153	21	123	125
22183	J42	296	-0.3	233	264	179	244	175	43	222	143
22184	A6	288		451	827	452	487	418	92	424	157
22185	A5	283	-0.1	44	936	158	23	582	22	499	288
22186	A4	280		451	924	281	692	637	49	474	549
22187	A3	274	-0.1	20	46	11	49	173	9	173	73
22188	A2	269		22	85	37	108	213	30	190	72
22189	A1	261		3	124	34	118	229	10	209	127
22190	I41	256		29	24	12	74	189	7	128	86
22195	I36	210	-0.2	31	18	12	23	75	8	57	17
22195/6	H/36	210		54	87	49	89	143	13	74	71
22196	H36	210	-0.2	77	156	86	155	210	18	90	125
22199	H33	194		16	20	24	45	60	11	99	62
22202	H30	178		98	123	70	105	106	18	87	72
22204	H28	168		16	24	19	47	68	16	111	36
22207	H25	156		18	97	47	92	283	12	162	161
22208	H24	155		23	24	23	91	194		169	143
22209	H23	153	-0.1	8	32	16	71	196	6	209	110
22210	H22	151	0.05	19	154	40	169	320	4	247	153
22211	H21	149	-0.05	13	10	8	85	161		148	88
22212	H20	147		24	102	39	144	238		164	160
22213	H19	145		44	78	45	130	155	3	119	122
22214	H18	143	0.05	17	38	26	160	215		102	148
22215	H17	141	0.1	59	106	35	151	235		119	132
22216	H16	139	0.1	44	90	61	144	271		133	81
22217	H15	137		191	278	173	178	170	10	65	178
22218	H14	135	0.1	331	275	157	222	144		59	146
22219	H13	133	0.3	573	431	266	247	201		124	79
22220	H12	130	0.3	488	383	173	252	132		141	112
22221	H11	128	0.2	386	279	172	207	146	1	92	90
22222	H10	127	0.2	168	336	247	191	170	10	117	91
22223	H9	126	0.2	272	274	149	201	170		128	44
22224	H8	124	0.3	463	418	198	296	198		115	157
22225	H7	122	0.2	299	321	153	212	175		141	106
22226	H6	120	0.3	311	362	193	218	165		106	61
22227	H5	118	0.3	437	390	121	234	155		74	58
22229	H3	114		317	214	152	147	153	2	71	98
22230	H2	111	0.3	400	329	87	210	150		84	47
22231	H1	109		325	221	92	134	134		78	98
22232	E1	108	0.1	254	246	157	158	120		82	67
22233	E2	107	0.2	196	356	142	208	149		127	118
22238	F4	105	0.05	262	184	59	164	139		136	99
22239	F5	107	0.1	302	142	65	110	95		59	52
22240	F6	104	0.3	631	263	79	336	134		249	110
22241	F7	102	0.2	452	206	56	232	95		168	83
22242	F8	100	0.2	503	280	127	434	128		216	123
22243	F9	98	0.3	476	266	74	517	134		321	125
22244	F10	96	0.1	287	170	59	337	75		195	135
22245	F11	94	0.3	419	215	72	304	88	2	133	117
22246	F12	92	0.15	191	138	35	214	70		91	117
22247	F13	91	0.2	424	245	72	337	139		104	146
22248	F14	89	0.25	379	197	79	312	93		126	184
22249	F15	87		219	155	65	175	119		139	142
22250	F16	85	0.05	298	195	74	202	121	10	72	95
22251	F17	83	0.3	642	191	153	341	147		165	69
22252	F18	81	0.3	703	383	195	282	189		63	180
22253	F19	79	0.2	363	288	97	217	121		119	98
22254	F20	77	0.25	312	311	72	306	182		122	104
22255	F21	76	0.3	372	308	74	252	169		142	111
22256	F22	74	0.25	550	333	200	262	155		190	79
22257	F23	72	0.25	393	303	68	256	129		90	158
22258	F24	70	0.3	316	222	46	216	71	7	72	107
22259	F25	68	0.3	556	275	136	294	122	14	161	83
22260	F26	66	0.3	388	263	86	266	125		114	59
22261	F27	64	0.2	307	183	47	207	94	14	92	85
22262	F28	62	0.2	290	219	48	229	107		105	87
22263	F29	60	0.3	244	225	41	223	95		86	36
22264	F30	58	0.4	421	306	67	290	109		119	39
22265	F31	56	0.25	250	202	98	232	104		131	89
22266	F32	54	0.25	364	326	157	242	140	2	155	98
22267	F33	53	0.3	408	269	88	242	95	4	136	97
22268	F34	49	0.3	503	301	122	256	124		79	104
22268/9	F/G34	49		430	310	85	282	128	0	87	114
22269	G34	49	0.25	356	318	47	308	131		95	123
22272	G37	34	0.3	278	222	66	170	71		69	56
22275	G40	20	0.3	419	383	158	237	177		95	75
22279	G44	0	0.3	447	321	117	271	171		136	126

Argiles <2µm (Normalisation à 100% + Rapports)

	% rel Sm (Sm/Sum)*100	% rel M1 (M1/Sum)*100	% rel ls (ls/Sum)*100	% rel K* (K*/Sum)*100	% rel C* (C*/Sum)*100	Sm/K*	Sm/C*	Sm/M1	K*/(M1+C*)
J60	31	31	13	17	9	1.9	3.5	1.0	0.4
J73	38	31	12	16	3	2.3	12.5	1.3	0.5
J68	34	25	18	9	14	4.0	2.4	1.4	0.2
J63	32	26	16	14	12	2.4	2.8	1.3	0.4
J58	35	29	12	14	11	2.5	3.2	1.2	0.4
J53	37	26	14	12	12	3.1	3.1	1.4	0.3
J49	38	25	14	13	10	3.0	3.8	1.5	0.4
J48	31	27	17	12	12	2.6	2.5	1.2	0.3
J42	25	29	19	16	10	1.6	2.4	0.9	0.4
A6	20	37	20	16	6	1.3	3.4	0.5	0.4
A5	4	81	14	1	1	3.0	5.2	0.0	0.0
A4	19	39	12	14	16	1.4	1.2	0.5	0.2
A3	16	37	9	27	12	0.6	1.4	0.4	0.6
A2	9	34	15	31	12	0.3	0.7	0.3	0.7
A1	1	44	12	26	16	0.0	0.1	0.0	0.4
I41	21	17	9	32	21	0.7	1.0	1.2	0.8
I36	37	21	14	21	6	1.7	5.9	1.7	0.8
H136	19	31	18	16	16	1.2	1.2	0.6	0.3
H36	16	33	18	14	19	1.2	0.9	0.5	0.3
H33	15	19	23	26	17	0.6	0.9	0.8	0.7
H30	25	31	18	15	12	1.7	2.1	0.8	0.3
H28	15	23	18	33	11	0.5	1.4	0.7	1.0
H25	7	38	19	18	18	0.4	0.4	0.2	0.3
H24	14	15	14	31	26	0.5	0.6	1.0	0.8
H23	6	25	13	37	19	0.2	0.3	0.3	0.8
H22	5	40	10	27	17	0.2	0.3	0.1	0.5
H21	11	9	7	46	27	0.2	0.4	1.3	1.3
H20	8	33	13	24	23	0.3	0.3	0.2	0.4
H19	15	26	15	22	22	0.7	0.7	0.6	0.4
H18	7	16	11	27	39	0.3	0.2	0.4	0.5
H17	17	30	10	20	23	0.8	0.7	0.6	0.4
H16	13	27	18	26	16	0.5	0.8	0.5	0.6
H15	23	34	21	6	16	4.0	1.5	0.7	0.1
H14	34	28	16	6	16	5.2	2.1	1.2	0.1
H13	37	28	19	10	6	3.8	6.0	1.3	0.3
H12	38	30	13	11	9	3.5	4.4	1.3	0.3
H11	37	27	16	10	10	3.7	3.8	1.4	0.3
H10	18	36	26	11	9	1.6	2.0	0.5	0.3
H9	30	31	17	17	6	1.8	5.3	1.0	0.5
H8	34	30	14	9	12	3.7	2.7	1.1	0.2
H7	30	33	16	12	9	2.5	3.3	0.9	0.3
H6	29	33	18	13	7	2.2	3.9	0.9	0.3
H5	37	33	10	11	11	3.3	4.3	1.1	0.3
H3	36	26	18	7	10	5.1	3.7	1.5	0.2
H2	39	32	8	13	7	3.0	5.3	1.2	0.3
H1	42	29	12	8	10	5.5	4.4	1.5	0.2
E1	31	30	19	11	9	2.9	3.6	1.0	0.3
E2	22	39	16	12	11	1.8	2.0	0.6	0.2
F4	39	28	9	14	10	2.8	3.8	1.4	0.4
F5	49	23	11	9	8	5.2	5.9	2.1	0.3
F6	48	20	6	18	8	2.7	6.1	2.4	0.6
F7	48	22	6	16	8	2.9	5.9	2.2	0.5
F8	37	21	9	21	12	1.8	3.2	1.8	0.6
F9	36	20	6	28	11	1.3	3.3	1.8	0.9
F10	34	20	7	23	16	1.4	2.1	1.7	0.6
F11	41	21	7	16	14	2.6	2.9	1.9	0.5
F12	33	24	6	16	21	2.0	1.6	1.4	0.4
F13	39	23	7	13	18	3.0	2.2	1.7	0.3
F14	39	20	8	13	19	3.0	2.0	1.9	0.3
F15	36	25	11	14	14	2.5	2.5	1.4	0.4
F16	39	25	10	11	15	3.4	2.6	1.5	0.3
F17	48	14	12	18	8	2.7	6.4	3.4	0.8
F18	45	25	12	5	13	9.6	3.4	1.8	0.1
F19	38	30	10	12	10	3.1	3.7	1.3	0.3
F20	31	31	7	17	14	1.9	2.2	1.0	0.4
F21	37	31	7	14	11	2.6	3.4	1.2	0.3
F22	41	25	15	14	6	3.0	7.1	1.7	0.5
F23	39	30	7	9	16	4.2	2.4	1.3	0.2
F24	40	28	6	11	16	3.6	2.4	1.4	0.2
F25	44	22	11	15	8	2.9	5.6	2.0	0.5
F26	39	26	9	17	9	2.2	4.3	1.5	0.5
F27	41	25	6	14	13	2.9	3.1	1.7	0.4
F28	37	28	6	16	13	2.3	2.8	1.3	0.4
F29	33	31	6	21	9	1.6	3.6	1.1	0.5
F30	39	28	6	20	7	1.9	5.9	1.4	0.6
F31	32	26	13	18	12	1.8	2.7	1.2	0.5
F32	33	30	15	14	9	2.4	3.8	1.1	0.4
F33	41	27	9	14	10	2.9	4.0	1.5	0.4
F34	43	25	10	9	12	4.6	3.5	1.7	0.2
F1G34	39	28	8	11	14	3.5	2.7	1.4	0.3
G34	35	31	5	13	17	2.7	2.0	1.1	0.3
G37	38	30	9	13	10	3.0	3.7	1.3	0.3
G40	35	32	13	11	9	3.2	4.0	1.1	0.3
G44	39	28	10	12	11	3.2	3.4	1.4	0.3
moy tot	28	27	12	16	12				
moy KT	32	27	11	17	14				
moy arg	34	31	14	11	10				
moy avant	40	26	9	16	13				
moy après	23	29	15	18	16				

Argiles 2-16 μm (CPS)

CPS 16N	Position (cm)	Décalage CPS	C001 5.9	M001 8.83	C002 - K001 12.45	M002 17.7	C003 18.78	Otz 20.85	Goethite 21.2	K002 24.9	C004 25.1 - 25.2	FK 27.5	Plg 27.9	Hématite 33.2	
22144	J60	1150	-0.2	244	249	271	300	81	466	2	97	306	96	185	18
22151	J73	1008	-0.14	316	518	457	422	148	656	3	118	387	102	273	7
22158	J68	948	-0.25	157	343	299	329	121	751	10	155	357	109	451	18
22161	J63	848		417	491	481	442	152	856	27	114	434	104	362	19
22171	J53	666	-0.25	138	274	327	303	134	652	20	106	360	81	418	13
22177	J48	393	-0.15	569	462	325	531	172	103	19	183	204	222	135	27
22183	J42	296	-0.1	227	301	262	333	123	370	7	98	169	103	179	6
22184	A6	288	-0.25	183	417	408	523	197	596	37	166	461	174	334	30
22185	A5	263	-0.1	51	720	548	414	204	1484	2	136	542	214	1101	11
22186	A4	280	-0.2	101	637	539	590	208	667	23	275	469	135	496	7
22187	A3	274	-0.2	20	80	104	183	88	416	8	71	250	62	325	10
22188	A2	269	-0.2	19	53	85	164	77	526	6	98	247	62	485	3
22189	A1	261	-0.25	15	32	72	75	55	542	17	66	156	58	436	20
22190	I41	256	-0.3	19	14	41	114	47	229	9	87	147	70	232	26
22195	I66	210	-0.15	42	91	116	174	98	317	11	122	182	47	224	20
22195/6	H/36	210		31	51	75	147	72	250	14	110	181	43	181	17
22196	H36	210	-0.25	19	10	34	119	45	183	16	97	179	38	138	13
22199	H33	194	-0.1	32	113	138	192	104	403	14	116	198	62	212	7
22202	H30	178	-0.02	72	157	207	258	84	426	5	93	242	58	339	14
22204	H28	168	-0.15	27	112	160	203	98	427	11	93	251	63	220	22
22207	H25	156	-0.1	66	224	250	290	124	518	15	66	219	92	303	9
22208	H24	155	-0.1	108	272	205	308	168	126	18	85	222	110	95	3
22209	H23	153	-0.25	23	45	104	144	64	339	3	120	153	49	154	12
22210	H22	151		81	274	252	295	115	497	3	168	200	71	268	7
22211	H21	149	-0.1	50	172	189	241	88	485	7	86	246	63	285	7
22212	H20	147	-0.15	42	189	173	215	93	451	7	76	214	64	311	
22213	H19	145	-0.1	58	181	209	241	106	427	14	88	302	86	305	9
22214	H18	143	-0.1	21	110	146	220	118	358	1	97	193	52	238	13
22215	H17	141	-0.1	56	140	161	235	97	441	8	82	298	57	224	11
22216	H16	139	-0.1	35	172	198	237	103	500	8	57	283	68	314	5
22217	H15	137	0.2	106	476	369	330	131	623	5	64	333	112	323	9
22218	H14	135	0.1	189	365	338	392	127	588	7	137	284	92	327	4
22219	H13	133	0.2	234	419	381	405	140	687	4	100	330	87	324	18
22220	H12	130	0.2	194	444	400	404	133	758	8	132	237	32	465	13
22221	H11	128		169	366	299	360	143	634	6	118	187	69	404	11
22222	H10	127	0.2	362	581	306	443	146	121	6	118	187	139	79	27
22223	H9	126	0.1	209	276	276	303	119	533		129	200	26	241	9
22224	H8	124	0.1	176	412	359	377	134	642		111	341	64	388	
22226	H6	120	0.2	171	392	384	312	125	541	1	87	220	36	217	5
22227	H5	118	0.2	131	422	352	295	113	597	3	95	155	95	253	5
22228	H4	116	-0.1	56	163	171	173	92	403	10	79	255	58	238	19
22229	H3	114	0.15	123	378	313	313	164	705	7	111	281	76	395	7
22230	H2	111	0.2	193	358	316	217	98	730	2	82	207	41	264	14
22231	H1	109		85	230	233	211	88	595		97	229	63	322	9
22232	E1	108	-0.15	58	170	85	52	18	219	9	39	62	47	88	17
22233	E2	107	0.15	149	514	237	219	83	184		124	122	102	88	
22236	F4	105	0.1	176	247	271	189	88	729		23	117	76	366	
22239	F5	107	0.1	174	312	253	212	93	691	2	81	187	81	381	
22240	F6	104	-0.05	126	161	224	150	90	495	9	90	238	47	283	
22241	F7	102		101	217	240	198	69	689		87	250	30	481	2
22243	F9	96	0.2	127	327	415	223	97	846	7	100	321	48	341	6
22244	F10	96	0.2	121	249	364	199	97	680		42	205	73	478	1
22245	F11	94		84	230	266	153	76	591	1	43	226	40	326	
22246	F12	92	-0.1	47	150	200	195	76	564		60	265	38	493	
22247	F13	91	0.05	87	184	249	174	78	462		92	229	12	310	
22248	F14	89	0.2	123	328	396	245	114	691		58	236	26	476	
22249	F15	87	0.15	150	390	392	298	125	803	11	58	342	86	455	
22250	F16	85	0.15	131	329	371	316	106	848	1	36	310	36	652	
22251	F17	83	0.2	144	319	317	268	109	601	7	40	257	61	483	9
22252	F18	81	0.15	165	333	326	315	119	554	1	48	350	17	414	
22254	F20	77	0.1	132	389	248	339	106	647	10	40	334	128	673	
22257	F23	72	0.1	137	292	314	300	122	628		33	242	83	591	4
22258	F24	70	0.1	82	388	344	383	108	630	5	89	291	77	593	7
22259	F25	68	0.1	140	290	376	277	95	669		53	267	41	476	
22260	F26	66	-0.1	81	160	225	233	93	643		51	297	56	527	5
22261	F27	64		98	230	250	247	88	669		40	253	47	387	
22262	F28	62	0.1	116	286	324	272	88	509		75	263	54	309	4
22263	F29	60	0.1	74	226	287	219	109	371		64	217	51	338	2
22264	F30	58	0.1	118	337	341	343	92	652	1	51	280	46	558	3
22265	F31	56	0.1	137	244	294	235	92	483		80	296	63	360	6
22266	F32	54	0.15	141	391	331	346	95	688	7	42	260	56	667	6
22267	F33	53		94	273	350	314	100	661		68	339	38	678	
22268	F34	49	0.3	242	493	415	382	140	679		42	282	13	457	
22268/9	F/G34	49		160	449	410	377	120	664	4	34	242	14	484	0
22269	G34	49	0.2	118	405	404	371	100	648	7	25	202	14	510	
22272	G37	34	0.15	165	319	323	279	134	509		87	234	53	405	20
22275	G40	20	0.1	149	296	311	274	117	511		54	266	71	311	43
22279	G44	0	0.12	130	283	318	302	89	551		52	244	48	391	31

Argiles 2-16 µm (Normalisation à 100% + Rapports)

	% rel M1 (M1/Sum)*100	% rel K* (K*/Sum)*100	% rel C* (C*/Sum)*100		K*/(M+C*)	FK/Plg	Qtz/FK	Qtz/Plg
J80	48	13	40		0.1	0.5	4.9	2.5
J73	53	11	36		0.1	0.4	6.4	2.4
J68	53	14	32		0.2	0.2	6.9	1.7
J63	51	10	39		0.1	0.3	8.2	2.4
J53	46	12	42		0.1	0.2	8.0	1.6
J48	59	20	22		0.2	1.6	0.5	0.8
J42	53	17	29		0.2	0.6	3.6	2.1
A6	51	13	36		0.2	0.5	3.4	1.8
A5	57	9	35		0.1	0.2	6.9	1.3
A4	54	17	29		0.2	0.3	4.9	1.3
A3	43	13	44		0.1	0.2	6.7	1.3
A2	38	17	44		0.2	0.1	8.5	1.1
A1	31	21	48		0.3	0.1	9.3	1.2
I41	25	28	47		0.4	0.3	3.3	1.0
I36	44	22	34		0.3	0.2	6.7	1.4
M36	40	23	37		0.3	0.2	5.9	1.4
H36	23	27	50		0.4	0.3	4.8	1.3
H33	45	20	35		0.3	0.3	6.5	1.9
H30	43	16	41		0.2	0.2	7.3	1.3
H28	41	16	43		0.2	0.3	6.8	1.9
H25	47	12	40		0.1	0.3	5.6	1.7
H24	57	12	31		0.1	1.2	1.1	1.3
H23	30	31	39		0.4	0.3	6.9	2.2
H22	52	22	26		0.3	0.3	7.0	1.9
H21	48	14	39		0.2	0.2	7.9	1.7
H20	52	13	35		0.1	0.2	7.0	1.5
H19	46	12	41		0.1	0.3	5.0	1.4
H18	43	19	38		0.2	0.2	6.9	1.5
H17	47	12	42		0.1	0.3	7.7	2.0
H16	46	9	45		0.1	0.2	7.4	1.6
H15	56	7	37		0.1	0.3	5.6	1.9
H14	51	16	33		0.2	0.3	6.4	1.8
H13	52	11	37		0.1	0.3	7.9	2.1
H12	53	17	30		0.2	0.1	23.7	1.6
H11	55	17	28		0.2	0.2	9.2	1.6
H10	66	13	21		0.2	1.8	0.9	1.5
H9	50	20	30		0.2	0.1	20.5	2.2
H8	53	11	35		0.1	0.2	10.0	1.7
H6	51	14	35		0.2	0.2	15.0	2.5
H5	55	17	28		0.2	0.4	6.3	2.4
H4	49	12	39		0.1	0.2	6.9	1.7
H3	55	13	32		0.1	0.2	9.3	1.8
H2	53	11	36		0.1	0.2	17.8	2.8
H1	50	15	35		0.2	0.2	9.4	1.8
E1	67	13	20		0.1	0.5	4.7	2.5
E2	68	16	16		0.2	1.2	1.8	2.1
F4	48	9	44		0.1	0.2	9.6	2.0
F5	55	14	31		0.2	0.2	8.5	1.8
F6	42	16	42		0.2	0.2	10.5	1.7
F7	47	14	39		0.2	0.1	23.0	1.4
F9	44	13	43		0.2	0.1	17.6	2.5
F10	41	10	49		0.1	0.2	9.3	1.4
F11	46	9	45		0.1	0.1	14.8	1.8
F12	43	11	47		0.1	0.1	14.8	1.1
F13	42	16	41		0.2	0.0	38.5	1.5
F14	45	11	44		0.1	0.1	26.6	1.5
F15	50	7	43		0.1	0.2	9.3	1.8
F16	47	6	47		0.1	0.1	23.6	1.3
F17	50	7	43		0.1	0.1	9.9	1.2
F18	51	6	44		0.1	0.0	32.6	1.3
F20	60	4	36		0.0	0.2	5.1	1.0
F23	48	6	46		0.1	0.1	7.6	1.1
F24	53	11	36		0.1	0.1	8.2	1.1
F25	44	9	47		0.1	0.1	16.3	1.4
F26	42	9	50		0.1	0.1	11.5	1.2
F27	48	7	45		0.1	0.1	14.2	1.7
F28	47	12	41		0.1	0.2	9.4	1.6
F29	44	16	40		0.2	0.2	7.3	1.1
F30	50	8	43		0.1	0.1	14.2	1.2
F31	45	12	43		0.1	0.2	7.7	1.3
F32	54	6	39		0.1	0.1	12.3	1.0
F33	44	9	47		0.1	0.1	17.4	1.0
F34	54	6	40		0.1	0.0	52.2	1.5
F/G34	52	6	42		0.1	0.0	49.1	1.4
G34	50	5	44		0.1	0.0	46.3	1.3
G37	50	14	37		0.2	0.1	9.6	1.3
G40	49	9	43		0.1	0.2	7.2	1.6
G44	47	9	44		0.1	0.1	11.5	1.4
moy tot	48	13	39					
moy KT	43	10	34					
moy arg	58	13	29					
moy avant	47	10	43					
moy après	52	14	34					

**Diagramme ternaire des micas (<2 μm) et des chlorites (2-16 μm)
(% relatifs)**

Triplot M (2G+2N)	M 1 % rel	M 2 % rel	M 5 % rel
J80	37	17	46
J73	65	17	18
J68	56	20	25
J63	48	17	34
J58	53	23	24
J53	55	24	20
J49	54	29	17
J46	41	26	34
J42	43	29	28
A6	49	25	26
A5	45	28	27
A4	45	31	23
A3	12	44	44
A2	20	49	31
A1	25	46	29
I41	8	61	31
H/36	28	45	27
H33	10	40	50
H30	36	31	32
H28	12	34	54
H25	18	54	28
H24	6	49	45
H23	9	54	37
H22	26	54	21
H21	4	64	32
H20	24	55	21
H19	24	47	30
H18	11	62	27
H17	24	53	23
H16	19	56	26
H15	47	29	24
H14	52	27	21
H13	54	25	20
H12	62	21	17
H11	50	26	24
H10	48	24	28
H9	47	29	24
H8	54	26	20
H7	51	28	21
H6	56	25	19
H5	59	24	17
H3	43	31	26
H2	58	26	16
H1	47	29	24
E1	57	28	16
E2	63	26	11
F4	44	33	23
F6	54	28	18
F7	53	25	22
F8	54	25	21
F9	53	27	20
F10	55	24	21
F11	59	24	16
F12	52	26	22
F13	49	28	22
F14	56	27	17
F15	39	30	32
F16	50	31	19
F17	40	31	29
F18	54	27	19
F20	53	31	17
F21	51	28	21
F23	58	25	17
F24	64	20	16
F25	57	25	18
F26	58	28	14
F27	55	28	17
F28	55	27	18
F29	57	24	19
F30	63	23	14
F31	52	27	22
F32	60	26	14
F33	56	20	24
F/G34	59	24	17
G37	58	19	23
G40	58	27	15
G44	57	31	12

Triplot C (16N)	C 1 % rel	C 2 % rel	C 3 % rel
J80	41	45	14
J73	34	50	16
J68	27	52	21
J63	40	46	14
J53	23	55	22
J46	53	30	16
J42	37	43	20
A6	23	52	25
A5	6	68	25
A4	12	64	25
A3	9	49	42
A2	10	47	43
A1	11	51	39
I41	18	38	44
H/36	17	42	40
H33	12	50	38
H30	20	57	23
H28	9	56	34
H25	15	57	28
H24	22	43	35
H23	12	54	34
H22	18	56	26
H21	15	58	27
H20	14	56	30
H19	16	56	28
H18	7	52	41
H17	18	51	31
H16	10	59	31
H15	17	61	22
H14	29	52	19
H13	31	50	19
H12	27	55	18
H11	28	49	23
H10	44	38	18
H9	35	46	20
H8	26	54	20
H6	25	56	18
H5	22	59	19
H4	18	54	29
H3	21	52	27
H2	32	52	16
H1	21	57	22
E1	36	53	11
E2	32	51	18
F4	33	51	17
F6	29	51	20
F7	25	59	17
F9	20	65	15
F10	21	63	17
F11	20	62	18
F12	15	62	24
F13	21	60	19
F14	19	63	18
F15	22	59	19
F16	22	61	17
F17	25	56	19
F18	27	53	20
F20	27	51	22
F23	24	55	21
F24	15	64	20
F25	23	62	16
F26	20	56	23
F27	22	57	20
F28	22	61	17
F29	16	61	23
F30	21	62	17
F31	26	56	18
F32	25	58	17
F33	17	64	18
F/G34	25	58	17
G37	27	52	22
G40	26	54	20
G44	24	59	17

3.2 Rock Eval

Echantillons	PC (%)	RC (%)	TOC (%)	MINC (%)	HI (mg HC/g TOC)	OI (mg CO ₂ /g TOC)	Tmax (°C)	SI (mg HC/g)	S2a (mg HC/g)	S2b (mg HC/g)	S3	Quant	Sample Date	File
J80	0.01	0.15	0.16	5.68	0	213	-42	0.00	0.00	0.00	0.33	60.7	10-25-05-17-20-52	1396_12_00
J73	0.01	0.18	0.19	5.96	0	165	-42	0.00	0.00	0.00	0.31	56.2	10-25-05-18-22-09	1396_13_00
J67	0.01	0.21	0.22	4.80	0	195	-42	0.00	0.00	0.00	0.43	62.3	10-25-05-19-33-09	1396_14_00
J61	0.01	0.18	0.20	5.35	0	237	-42	0.00	0.00	0.00	0.46	55.2	10-25-05-20-40-24	1396_15_00
J55	0.02	0.14	0.16	6.49	0	444	-42	0.00	0.00	0.00	0.71	52.5	10-25-05-21-49-38	1396_16_00
J53	0.00	0.16	0.16	5.23	0	85	-42	0.00	0.00	0.00	0.14	59.2	10-25-05-07-23-12	1396_17_00
J49	0.01	0.16	0.19	6.24	0	187	-41	0.00	0.00	0.00	0.36	62	10-26-05-08-30-20	1396_18_00
J48	0.00	0.02	0.02	0.11	0	627	-41	0.00	0.00	0.00	0.14	57	10-26-05-14-56-22	1396_19_00
J42	0.02	0.00	0.02	0.21	0	3667	-41	0.00	0.00	0.00	0.60	52.8	10-26-05-15-46-58	1396_20_00
A6	0.01	0.00	0.01	0.14	0	3667	-41	0.00	0.00	0.00	0.38	60.2	10-26-05-17-24-22	1396_21_00
A5	0.02	0.41	0.42	2.03	0	145	-41	0.00	0.00	0.00	0.61	59.6	10-26-05-18-59-13	1396_22_00
H20	0.01	0.02	0.03	8.68	0	1054	-41	0.00	0.00	0.00	0.31	63.8	11-08-05-12-32-52	1396c12_00
H19	0.01	0.02	0.03	8.68	0	778	-42	0.00	0.00	0.00	0.21	59.8	11-08-05-13-38-52	1396c13_00
H18	0.01	0.03	0.04	8.66	0	582	-42	0.00	0.00	0.00	0.21	59.6	11-08-05-14-45-03	1396c14_00
H17	0.01	0.02	0.03	8.62	0	1077	-42	0.00	0.00	0.00	0.28	57.9	11-08-05-15-51-11	1396c15_00
H16	0.01	0.04	0.05	8.30	0	568	-42	0.00	0.00	0.00	0.28	63.1	11-08-05-16-57-11	1396c16_00
H15	0.01	0.05	0.05	7.35	0	425	-43	0.00	0.00	0.00	0.23	58.9	11-08-05-18-03-16	1396c17_00
H14	0.01	0.04	0.05	8.39	0	537	-43	0.00	0.00	0.00	0.25	56.9	11-08-05-19-09-12	1396c18_00
H13	0.01	0.06	0.07	6.78	0	372	-43	0.00	0.00	0.00	0.26	58.7	11-08-05-20-15-01	1396c19_00
H11	0.01	0.04	0.05	7.99	0	594	-43	0.00	0.00	0.00	0.27	57.4	11-08-05-22-26-38	1396c20_00
H10	0.01	0.03	0.04	6.92	0	524	-44	0.00	0.00	0.00	0.20	59.2	11-08-05-23-33-32	1396c21_00
H9	0.01	0.02	0.02	7.01	0	898	-41	0.00	0.00	0.00	0.22	51.1	11-08-05-14-09-16	1396d12_00
H8	0.01	0.02	0.02	7.18	0	916	-41	0.00	0.00	0.00	0.22	58.5	11-08-05-15-15-25	1396d13_00
H7	0.01	0.03	0.04	7.36	0	785	-41	0.00	0.00	0.00	0.27	53.9	11-09-05-16-21-22	1396d14_00
H6	0.01	0.06	0.07	6.92	0	515	-37	0.00	0.00	0.00	0.35	52.2	11-08-05-17-27-16	1396d15_00
H5	0.01	0.03	0.04	8.90	0	799	-41	0.00	0.00	0.00	0.28	58.2	11-09-05-18-33-15	1396d16_00
H4	0.00	0.03	0.04	8.72	0	480	-41	0.00	0.00	0.00	0.17	60.1	11-09-05-19-39-16	1396d17_00
H3	0.00	0.05	0.05	7.88	0	325	-41	0.00	0.00	0.00	0.18	55.2	11-09-05-20-45-09	1396d18_00
H2	0.01	0.07	0.07	8.41	0	349	-41	0.00	0.00	0.00	0.25	60.4	11-08-05-21-51-08	1396d19_00
E1	0.00	0.06	0.07	6.41	0	194	-41	0.00	0.00	0.00	0.12	60.7	11-09-05-22-57-03	1396d20_00
E2	0.01	0.10	0.11	5.67	0	356	-41	0.00	0.00	0.00	0.15	55.5	11-10-05-00-02-56	1396d21_00
F1	0.01	0.04	0.05	6.55	0	620	-41	0.00	0.00	0.00	0.32	52.1	01-17-06-15-22-35	1396_12_00
F2	0.01	0.06	0.06	5.84	0	446	-41	0.00	0.00	0.00	0.28	54.4	01-17-06-16-27-54	1396_13_00
F3	0.01	0.05	0.06	5.80	0	578	-41	0.00	0.00	0.00	0.33	59.5	01-17-06-17-33-36	1396_14_00
F4	0.01	0.03	0.03	8.54	0	716	-41	0.00	0.00	0.00	0.23	56.9	01-17-06-18-38-45	1396_15_00
F5	0.01	0.02	0.02	9.02	0	771	-41	0.00	0.00	0.00	0.19	63.4	01-17-06-19-43-51	1396_16_00
F6	0.01	0.02	0.03	8.82	0	952	-41	0.00	0.00	0.00	0.25	59.7	01-17-06-20-49-06	1396_17_00
F7	0.01	0.02	0.02	8.86	0	1165	-41	0.00	0.00	0.00	0.27	58.2	01-17-06-21-54-18	1396_18_00
F8	0.01	0.02	0.02	8.41	0	830	-41	0.00	0.00	0.00	0.21	60.8	01-17-06-22-59-26	1396_19_00
F9	0.01	0.02	0.02	8.54	0	1102	-42	0.00	0.00	0.00	0.25	55.6	01-18-06-00-04-26	1396_20_00
F10	0.01	0.02	0.03	9.13	0	894	-42	0.00	0.00	0.00	0.26	52.8	01-18-06-01-09-31	1396_21_00
F11	0.01	0.02	0.02	8.60	0	1233	-42	0.00	0.00	0.00	0.30	63.3	01-18-06-02-14-35	1396_22_00
F12	0.01	0.01	0.02	8.67	0	1457	-42	0.00	0.00	0.00	0.31	58.5	01-18-06-03-19-38	1396_23_00
F13	0.01	0.02	0.03	8.49	0	1015	-42	0.00	0.00	0.00	0.27	58.4	01-18-06-04-24-44	1396_24_00
F14	0.01	0.03	0.03	8.44	0	785	-42	0.00	0.00	0.00	0.25	53.1	01-18-06-05-29-49	1396_25_00
F15	0.01	0.01	0.02	7.64	0	1470	-42	0.00	0.00	0.00	0.31	59.7	01-18-06-06-35-02	1396_26_00
F16	0.01	0.01	0.02	7.70	0	1366	-42	0.00	0.00	0.00	0.21	62	01-18-06-07-40-19	1396_27_00
F19	0.01	0.00	0.01	0.11	0	3667	-35	0.00	0.00	0.00	0.30	61.6	01-18-06-14-39-14	1396_29_00
F21	0.02	0.02	0.03	9.42	0	1831	-39	0.00	0.00	0.00	0.64	52.5	01-18-06-16-44-33	1396_33_00
F22	0.01	0.02	0.03	7.30	0	876	-39	0.00	0.00	0.00	0.28	58.6	01-18-06-16-49-51	1396_34_00
F23	0.01	0.03	0.04	8.20	0	671	-38	0.00	0.00	0.00	0.28	58.1	01-18-06-17-54-58	1396_35_00
F24	0.01	0.02	0.03	8.50	0	1031	-35	0.00	0.00	0.00	0.29	55.7	01-18-06-19-00-07	1396_36_00
F25	0.01	0.02	0.02	7.17	0	1873	-33	0.00	0.00	0.00	0.37	63.6	01-18-06-20-05-11	1396_37_00
F26	0.01	0.02	0.02	9.24	0	1342	-33	0.00	0.00	0.00	0.33	56.3	01-18-06-21-10-47	1396_38_00
F27	0.02	0.01	0.03	8.53	0	2062	-33	0.00	0.00	0.00	0.60	53.3	01-18-06-22-15-53	1396_39_00
F28	0.01	0.02	0.03	6.59	0	1805	-37	0.00	0.00	0.00	0.54	62.7	01-18-06-23-21-03	1396_40_00
F29	0.01	0.02	0.03	8.96	0	900	-37	0.00	0.00	0.00	0.20	61.9	01-19-06-01-31-13	1396_41_00
F30	0.01	0.01	0.02	6.65	0	900	-37	0.00	0.00	0.00	0.20	61.9	01-19-06-01-31-13	1396_42_00
F31	0.01	0.02	0.03	7.60	0	1174	-37	0.00	0.00	0.00	0.34	63.2	01-19-06-02-36-18	1396_43_00
F32	0.01	0.01	0.02	7.78	0	1771	-35	0.00	0.00	0.00	0.28	59.6	01-19-06-03-41-24	1396_44_00
F33	0.02	0.01	0.03	6.42	0	2598	-35	0.00	0.00	0.00	0.72	64.3	01-19-06-04-46-29	1396_45_00
F34	0.04	0.02	0.06	7.48	0	2363	-35	0.00	0.00	0.00	1.40	54.6	01-19-06-05-51-27	1396_46_00
G37	0.01	0.01	0.02	7.23	0	1313	-35	0.00	0.00	0.00	0.26	52.5	01-19-06-06-56-37	1396_47_00
G40	0.01	0.02	0.02	6.14	0	1250	-35	0.00	0.00	0.00	0.23	53.1	01-19-06-08-01-51	1396_48_00

3.3 ICP-MS

3.3.1 Minéralisations

Date Miné . 08.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22153	J71	0.1253	18.396	121.111	102.7143	0.1670	67.76
2	22155	J69	0.1254	18.580	88.020	69.4405	0.1514	80.22
3	22174	J51	0.1246	18.407	98.234	79.8269	0.1576	75.12
4	22182	J43	0.1250	18.419	86.273	67.8542	0.1662	68.32
5	22184	A6	0.1245	18.575	95.134	76.5594	0.1438	86.18
6	22186	A4	0.1249	18.431	84.923	66.4921	0.1509	80.54
7	22187	A3	0.1246	18.345	76.516	58.1711	0.1467	83.87
8	22188	A2	0.1247	18.358	78.991	60.633	0.1486	82.36
9	22189	A1	0.1250	18.521	69.472	50.9514	0.1441	86.00
10	-	Blanc 8.2.06	-	18.469	74.603	56.1344	0.1266	-

Date Miné : 09.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22194	I37	0.2001	18.368	124.874	106.5056	0.1743	75.66
2	22197	H35	0.2005	18.401	124.296	105.8951	0.1710	77.36
3	22201	H31	0.2004	18.416	123.298	104.8814	0.1712	77.25
4	22207	H25	0.2000	18.514	123.278	104.7637	0.1757	74.95
5	22213	H19	0.1995	18.480	122.902	104.4218	0.1633	81.10
6	22217	H15	0.1995	18.403	122.784	104.3811	0.1750	75.24
7	22218	H14	0.1997	18.412	121.440	103.028	0.1784	73.56
8	22219	H13	0.2000	18.528	123.252	104.7239	0.1747	75.45
9	22221	H11	0.1995	18.439	124.645	106.2051	0.1650	80.25
10	-	Blanc 9.02.06	-	18.335	123.777	105.4413	0.1256	-

Date Miné : 10.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22222	H10	0.2495	18.544	119.000	100.4564	0.1828	75.83
2	22223	H9	0.2495	18.416	126.847	108.4305	0.1885	73.55
3	22224	H8	0.2505	18.348	124.620	106.2722	0.1950	71.06
4	22225	H7	0.2502	18.380	125.859	107.4792	0.1937	71.54
5	22226	H6	0.2497	18.422	124.154	105.732	0.1862	74.49
6	22230	H2	0.2500	18.344	122.425	104.0809	0.1814	76.44
7	22231	H1	0.2500	18.507	127.408	108.9011	0.1742	79.32
8	22235	F1	0.2504	18.494	120.501	102.0062	0.1672	82.15
9	22236	F2	0.2503	18.429	127.202	108.7727	0.1539	87.46
10	-	Blanc 10.2.06	-	18.514	121.982	103.4671	0.1225	-

Date Miné : 16.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22237	F3	0.2500	18.870	125.569	106.699	0.1528	87.60
2	22238	F4	0.2495	18.877	119.366	100.4894	0.1666	82.04
3	22240	F6	0.2499	18.857	122.274	103.4167	0.1766	78.07
4	22241	F7	0.2503	18.856	121.116	102.2595	0.1789	77.19
5	22242	F8	0.2495	18.885	125.542	106.657	0.1787	77.19
6	22243	F9	0.2502	18.825	126.776	107.951	0.1753	78.62
7	22245	F11	0.2495	18.765	122.573	103.8071	0.1743	78.96
8	22246	F12	0.2502	18.860	121.115	102.255	0.1748	78.82
9	22247	F13	0.2500	18.843	122.728	103.8851	0.1731	79.48
10	-	Blanc 16.2.06	-	18.908	124.874	105.9659	0.1218	-

Date Miné : 21.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22248	F14	0.1999	18.952	122.582	103.6296	0.1621	81.14
2	22249	F15	0.2004	18.836	119.902	101.0661	0.1702	77.15
3	22251	F17	0.1995	18.903	123.008	104.1045	0.1727	75.79
4	22252	F18	0.2004	18.876	115.999	97.1237	0.1741	75.20
5	22253	F19	0.2002	18.854	116.741	97.8864	0.1764	74.03
6	22254	F20	0.2002	18.796	117.070	98.2739	0.1760	74.23
7	22255	F21	0.1999	18.909	115.591	96.6824	0.1653	79.54
8	22258	F24	0.1998	18.923	122.141	103.2179	0.1671	78.63
9	22259	F25	0.2005	18.929	119.230	100.3005	0.1702	77.16
10	-	Blanc 21.2.06	-	18.915	114.387	95.4719	0.1244	-

Date Miné : 27.02.06

N° étude(s) ou identifiant(s) : Et 1396, Gaël Comment

Ech.	Numéro GEA	Identif.	Prise éch (g)	Fl. Vides (g)	Fl. Pleins (g)	Volume (mL)	Filtre (g)	% sol
1	22261	F27	0.2503	18.798	138.382	119.5839	0.1782	78.87
2	22264	F30	0.2502	19.194	116.448	97.2538	0.1765	79.54
3	22265	F31	0.2503	18.798	118.744	99.9455	0.1751	80.10
4	22266	F32	0.2500	18.920	117.118	98.1977	0.1829	76.96
5	22267	F33	0.2495	18.902	122.061	103.1588	0.1751	80.04
6	22271	G36	0.2500	19.024	123.010	103.9864	0.1800	78.12
7	-	Blanc 27.2.06	-	19.489	119.984	100.4947	0.1253	-

3.3.2 Résultats

pph	22185	22186	22187	22188	22189	Mc4002	22194	22191	22190	22210	22211	22212	22213	22214	22215	22216	22219	22221	22225	22226	22239	22234	22236	Mc1000
U	14633	10200	10558	11309	5457	8654	7424	6281	8920	5290	8218	8156	8148	10233	9679	11299	11816	12134	7852	7271	6592	0	0	0
Ba	326	440	64	162	122	159	490	244	201	151	201	151	125	85	208	148	148	148	34	85	240	0	0	0
Ba	5070	22741	10669	25712	21948	10399	10469	3667	2526	1824	13642	10274	14203	15396	10595	26335	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206
Ni	110883	57044	10669	25712	21948	10399	10469	3667	2526	1824	13642	10274	14203	15396	10595	26335	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206
Na	16857	6724	10669	25712	21948	10399	10469	3667	2526	1824	13642	10274	14203	15396	10595	26335	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206	16206
Al	67507	459200	132709	465201	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440	307440
K	186590	124600	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720	100540	810720
Ca	203820	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535	25240535
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	15815	12079	11529	15815	8407	13911	8407	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911
Cr	25240	21716	18472	15815	12079	11529	15815	8407	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911	13911
Mn	820003	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564
Fe	5017622	905306	1094682	786243	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306	1094682	905306
Pb	1011622	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564	1360564
Ni	62826	51746	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023	5023
Co	110920	837826	99175	74718	31669	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507	19507
Zn	286750	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400	90400
Ga	276	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
Ge	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	2360	4253	2342	9284	1869	3862	1871	1644	1865	0	2762	2593	2164	614	614	614	614	614	614	614	614	614	614	614
Rb	15037	10375	9623	11327	8773	7395	8533	0	11025	8427	7392	7314	7021	8824	9129	7843	7788	4	9887	7984	9658	10565	6297	4269
Sr	84922	786653	897967	584274	789846	656554	789832	0	501498	545423	494427	525541	461396	494427	461396	494427	461396	80	538823	548778	461396	538823	548778	461396
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb	229	114	120	51	112	188	6930	101	63	0	103	25	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ru	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	173	1201	1387	498	112	60	103	262	418	0	54	508	60	46	63	46	41	56	170	13	94	121	95	637
Cd	213	205	409	65	216	303	103	262	418	0	54	508	60	46	63	46	41	56	170	13	94	121	95	637
In	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	832	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837	837
Th	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U	154	318	339	478	158	130	306	154	151	182	190	202	215	188	175	188	175	188	175	188	175	188	175	188

pph	22237	22238	22240	22241	22242	22243	22246	22247	Mc1002	22248	22249	22251	22252	22253	22254	22255	22258	22259	22261	22264	22265	22266	22267	22271	22270
U	9167	7637	9171	9607	443	6903	6481	7425	5970	140	7974	9629	5807	7291	7619	6904	6914	6920	10681	10319	9669	6884	7995	7645	
Ba	246	135	229	301	176	51	176	203	229	49	253	441	476	411	236	338	507	140	230	227	189	684	65	65	
Ba	3679	11637	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103	19103
Ni	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246	398246
Al	4119689	2965161	3304166	3615599	3745097	310380	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500	320500
K	1715084	742049	879889	1676883	789332	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378	608378
Ca	28914794	24671884	256770004	241931976	246513031	32001	260898929	272491961	32001	260898929	272491961	32001	260898929	272491961	32001	260898929	272491961	32001	260898929	272491961	32001	260898929	272491961	32001	260898929
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	10045	6995	6272	8304	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584	6584
Cr	311917	633007	530117	571912	514519	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320	476320
Mn	1988723	1988306	2632654	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467	2797467
Co	7288	6980	6364	9484	6013	4638	6267	5638	5523	130	5089	5091	7884	7316	9432	7991	5168	7717	508306	5095558	5171629	4265649	4265649	4265649	4265649
N	43012	38457	46962	336725	51060	45953	1399724	36271	54078	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080	32080
Cu	79726	158018	25300	80138	17511	13110	29245	10700	14446	10700	14446	10700	14446</												

Contigé (Mg)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30	F31	F32	F33	H1					
ppb	980	962	2215	2214	638	304	22182	22184	22186	A1	22188	22189	22194	H35	22197	H31	H25	22207	H19	22213	H19	22215	H13	22219	H11	22221	H10	22222	H9	22223	H8	22224	F30	F31	F32	H2	H1		
Li	14633	10380	10358	7439	8064	7439	7043	7043	7043	7494	8231	8009	8230	8218	8156	8156	8146	8146	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156	8156

Contigé (Mg)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30	F31	F32	F33	G36					
ppb	108	2235	2236	2237	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136			
Li	7271	6592	8027	7547	9031	8467	8518	8467	8518	8023	6341	7288	6830	8830	8722	7874	9829	9807	7291	7618	8904	6914	6940	10318	9699	8884	7945	10318	9699	8884	7945	10318	9699	8884	7945	10318	9699	8884	7945

3.3.3 Statistiques

Matrice de corrélation												
	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Pb	U
V	1	0,54454	0,22704	0,51571	-0,11159	0,14041	0,11535	0,17449	-0,21188	0,15107	0,2158	0,34409
Mn	0,54454	1	0,13992	0,62437	0,050425	0,59441	0,22066	0,37056	-0,16623	0,49182	0,34737	0,76968
Fe	0,22704	0,13992	1	-0,17058	-0,20976	-0,28438	-0,30368	-0,30057	-0,236	-0,3208	-0,15776	-0,20474
Co	0,51571	0,62437	-0,17058	1	0,22425	0,39373	0,38863	0,25065	0,050196	0,33365	0,23019	0,4796
Ni	-0,11159	0,050425	-0,20976	0,22425	1	0,13502	0,66665	-0,00464	0,9207	-0,02091	0,27646	0,025428
Cu	0,14041	0,59441	-0,28438	0,39373	0,13502	1	0,55829	0,84015	-0,05762	0,86932	0,48259	0,76238
Zn	0,11535	0,22066	-0,30368	0,38863	0,66665	0,55829	1	0,59168	0,48181	0,54577	0,41822	0,37396
As	0,17449	0,37056	-0,30057	0,25065	-0,00464	0,84015	0,59168	1	-0,13718	0,93737	0,38211	0,71381
Mo	-0,21188	-0,16623	-0,236	0,050196	0,9207	-0,05762	0,48181	-0,13718	1	-0,15776	0,12447	-0,14468
Cd	0,15107	0,49182	-0,3208	0,33365	-0,02091	0,86932	0,54577	0,93737	-0,15776	1	0,41348	0,78166
Pb	0,2158	0,34737	-0,15776	0,23019	0,27646	0,48259	0,41822	0,38211	0,12447	0,41348	1	0,40279
U	0,34409	0,76968	-0,20474	0,4796	0,025428	0,76238	0,37396	0,71381	-0,14468	0,78166	0,40279	1
Vecteurs propres												
V	0,10415	-0,11577	0,032309	-0,01523	0,23391	0,47247	0,55972	-0,18043	-0,06269	-0,50688	0,24905	0,16674
Mn	-0,18104	0,29929	-0,47209	0,35323	0,14056	0,078457	-0,46183	0,1297	0,02076	-0,36849	0,21293	0,31574
Fe	0,0021203	-0,07295	0,10064	-0,23517	-0,11782	-0,24707	0,045859	0,4327	0,67202	-0,36317	0,24991	-0,13795
Co	-0,018042	0,03339	0,09911	-0,33993	-0,1324	-0,5789	0,010221	-0,02525	-0,52532	-0,41435	0,015686	0,26811
Ni	0,70846	0,21466	0,10534	0,083243	0,050592	0,064665	-0,11511	0,13005	0,091441	-0,24295	-0,56441	0,1055
Cu	-0,052447	-0,25824	0,38229	0,014658	0,72	-0,1592	-0,15214	0,11196	0,096959	0,18109	0,025565	0,40241
Zn	-0,28437	-0,17877	-0,00588	0,56862	-0,24316	-0,2211	0,43969	0,18289	0,09422	-0,0194	-0,35626	0,3047
As	-0,095887	0,72425	0,075206	-0,26849	-0,02894	0,077344	0,31557	0,15916	0,10084	0,31823	0,057903	0,37682
Mo	-0,48996	-0,12176	-0,15155	-0,4677	0,094341	0,31216	-0,09953	0,12038	0,032975	-0,17439	-0,58401	0,010221
Cd	0,34472	-0,40793	-0,59633	-0,27664	-0,10533	-0,0133	0,086097	0,12735	0,042034	0,2884	0,062759	0,39489
Pb	-0,047827	0,029762	-0,0118	-0,07908	-0,10704	-0,16426	-0,0948	-0,79689	0,47559	-0,06252	-0,10281	0,25944
U	-0,011977	-0,19801	0,46313	-0,0065	-0,5308	0,40676	-0,33999	0,09372	-0,04707	0,00407	0,1482	0,38775
Valeurs propres												
	0,02141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,035742	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,07444	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,13561	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,15446	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,32879	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0,56784	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,6678	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,83028	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6256	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5314	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,0266
rCP												
	CP12	CP11	CP10	CP9	CP8	CP7	CP6	CP5	CP4	CP3	CP2	CP1
	0,015239	-0,02189	0,008815	-0,00561	0,091929	0,27091	0,42178	-0,14745	-0,05712	-0,64627	0,39626	0,37384
	-0,026491	0,056583	-0,1288	0,13008	0,055242	0,044987	-0,34802	0,10599	0,018916	-0,45707	0,33879	0,70789
	0,0003102	-0,01379	0,027459	-0,0866	-0,0463	-0,14167	0,034567	0,3536	0,61234	-0,46303	0,39762	-0,30928
	-0,0026399	0,006313	0,027041	-0,12518	-0,05204	-0,33194	0,007702	-0,02064	-0,47867	-0,52829	0,024958	0,6011
	0,10366	0,040583	0,02874	0,030654	0,019883	0,037079	-0,08674	0,10627	0,083321	-0,30976	-0,898	0,23654
	-0,0076742	-0,04882	0,1043	0,005398	0,28297	-0,09129	-0,11464	0,091494	0,088349	0,23089	0,040675	0,9022
	-0,04161	-0,0338	-0,0016	0,2094	-0,09556	-0,12678	0,33133	0,14946	0,085853	-0,02474	-0,56683	0,68313
	-0,01403	0,13692	0,020519	-0,09887	-0,01137	0,044349	0,2378	0,13007	0,09189	0,40573	0,092126	0,84483
	-0,071692	-0,02302	-0,04135	-0,17223	0,037077	0,17899	-0,075	0,09837	0,030047	-0,22234	-0,92918	0,022915
	0,05044	-0,07712	-0,1627	-0,10187	-0,0414	-0,00763	0,064879	0,10407	0,038302	0,3677	0,13167	0,88535
	-0,0069982	0,005627	-0,00322	-0,02912	-0,04207	-0,09419	-0,07144	-0,65121	0,43336	-0,07971	-0,16358	0,58166
	-0,0017525	-0,03744	0,12636	-0,00239	-0,20861	0,23324	-0,2562	0,076587	-0,04289	0,005189	0,23579	0,86933
%Variance Expliquée												
	%Var cum	CP										
	41,9	CP1	76,5 %									
	63,0	CP2	Variance									
	76,5	CP3	expliquée									
	83,4	CP4										
	89,0	CP5										
	93,7	CP6										
	96,5	CP7										
	97,8	CP8										
	98,9	CP9										
	99,5	CP10										
	99,8	CP11										
	100,0	CP12										

3.4 Phosphore

3.4.1 Echantillons

No	Echantillon
1	G44
2	G44
3	G41
4	G38
5	G35
6	F33
7	F31
8	F29
9	F27
10	F25
11	F23
12	F21
13	F20
14	F19
15	F18
16	F17
17	F16
18	F15
19	F14
20	F13
21	F12
22	F11
23	Blanc 1

No	Echantillon
24	G44
25	F10
26	F9
27	F8
28	F7
29	F6
30	F4
31	E3
32	E2
33	E1
34	H1
35	H2
36	H3
37	H4
38	H5
39	H6
40	H7
41	H8
42	H9
43	H10
44	H11
45	H12
46	Blanc 2

No	Echantillon
47	G44
48	H13
49	H14
50	H15
51	H16
52	H18
53	H20
54	H22
55	H25
56	H27
57	H30
58	H33
59	H36
60	I38
61	I41
62	A3
63	J42
64	J48
65	J49
66	J60
67	J70
68	J80
69	Blanc 3

3.4.2 Resultats

Echantillons	Position (cm)	Concentration (ppm)	Taux de sédimentation (cm/ka)	Taux d'accumulation du phosphore (mg/cm ² /ka)
G44	0	231	0.35	0.202
G41	16	275	0.35	0.240
G38	29	237	0.35	0.208
G35	44	283	0.35	0.247
F33	53	301	0.35	0.263
F31	56	233	0.35	0.204
F29	60	248	0.35	0.217
F27	64	437	0.35	0.382
F25	68	242	0.35	0.212
F23	72	255	0.35	0.223
F21	76	259	0.35	0.227
F20	77	290	0.35	0.254
F19	79	296	0.35	0.259
F18	81	281	0.35	0.246
F17	83	280	0.35	0.245
F16	85	246	0.35	0.216
F15	87	275	0.35	0.240
F14	89	246	0.35	0.216
F13	91	246	0.35	0.216
F12	92	252	0.35	0.220
F11	94	242	0.35	0.212
F10	96	226	0.35	0.198
F9	98	255	0.35	0.223
F8	100	266	0.35	0.232
F7	102	262	0.35	0.229
F6	104	262	0.28	0.183
F4	105	339	0.20	0.170
E3	106	291	0.20	0.145
E2	107	388	0.20	0.194
E1	108	272	0.20	0.136
H1	109	268	0.20	0.181
H2	111	305	0.27	0.252
H3	114	339	0.33	0.280
H4	116	308	0.33	0.254
H5	118	295	0.33	0.243
H6	120	370	0.33	0.305
H7	122	370	0.33	0.305
H8	124	384	0.33	0.317
H9	126	378	0.33	0.312
H10	127	426	0.33	0.352
H11	128	408	0.33	0.336
H12	130	409	0.33	0.338
H13	133	503	0.33	0.415
H14	135	421	0.33	0.347
H15	137	493	0.33	0.407
H16	139	459	0.33	0.379
H18	143	337	0.33	0.278
H20	147	312	0.33	0.257
H22	151	342	0.33	0.282
H25	156	430	0.33	0.355
H27	164	412	0.33	0.340
H30	178	343	0.33	0.283
H33	194	393	0.33	0.324
H36	210	379	0.33	0.313
I38	234	387	0.33	0.319
I41	256	476	0.33	0.393
A3	274	431	0.33	0.356
J42	296	418	0.33	0.345
J48	393	427	0.33	0.353
J49	608	448	0.33	0.370
J60	786	388	0.33	0.320
J70	972	433	0.33	0.357
J80	1150	388	0.33	0.320